

停车换乘与路票交易组合措施下 居民出行特性建模分析

孙振东¹, 张生瑞¹, 李 运², 赵文静³, 吴江玲¹, 朱春杨¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 内蒙古交通设计研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010030;
3. 中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410000)

摘 要:为了研究路票交易措施下的居民出行特性,与现有的交通管理措施如停车换乘措施相结合,针对停车换乘与路票交易组合措施下居民出行方式特点,设计以路段为收费单元的可交易电子路票收费方案,阐述其诱导居民选择不同出行方式的机理,并根据居民不同出行方式特点建立多项 Logit 模型。采用行为调查(RP)与意向调查(SP)相结合方法,对上海市工作出行前往中心区域特性进行调查,对比了工作出行者原出行方式与路票交易约束下出行方式的变化情况,并基于调查数据量化分析路票交易与停车换乘组合措施下出行者的出行方式选择影响因素。研究表明:当存在路票交易奖励机制时,有部分出行者从公共交通转向驾车绕路前往中心区域;以全程驾车为参照组分析发现,出行者居住位置对是否选择驾车绕路具有显著影响,距离中心区域越远越不倾向驾车绕路;在停车换乘与全程公共交通出行中,路票交易奖励机制发挥显著影响,且出行者在选择公共交通出行时会首先考虑路票收益,其次考虑出行时间因素;基于路段收费的路票交易方案在有效利用有限道路资源方面有积极作用,该研究结果可作为交通管理部门制定交通管理措施的理论依据。

关键词:交通工程;交通拥堵;路票交易;停车换乘;出行方式;多项 Logit

中图分类号:U491.1 **文献标志码:**A

Analysis of travel characteristics under combination of TCS and P & R

SUN Zhen-dong¹, ZHANG Sheng-rui¹, LI Yun², ZHAO Wen-jing³,
WU Jiang-ling¹, ZHU Chun-yang¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Inner Mongolia Traffic Design and Research Institute Co., LTD, Hohhot 010030, Inner Mongolia, China; 3. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410000, Hunan, China)

Abstract: To determine the commuting travel behavior characteristics of residents in the environment of the tradable credit scheme (TCS). Combining the park and ride (P & R) with the TCS, based on the characteristics of the travel mode of work commuting under combined measures, a tradable electronic road ticket charging scheme based on the toll unit for the road section was designed, and the mechanism for causing residents to choose different travel modes

was described. The multinomial logit model (MNL) was established according to the characteristics of different travel modes. Using a combination of revealed preference (RP) and stated preference (SP) surveys, a survey of work commuters in the central area of Shanghai was conducted to compare the original mode of commuter travel with the changes in commuting methods, under the restrictions of road ticket transactions. Based on the survey data, the factors influencing the commuter travel mode selection under the combination of road ticket transaction and parking transfer were quantitatively analyzed. The results show that when a road ticket transaction reward mechanism is in place, some commuters switched from public transportation to self-driving detours to the central area. Based on the analysis of the whole driving group as a reference group, it is found that the living position of the commuter has a significant influence on whether to choose a detour or not, and that the farther away the commuter lives from the center area, the less tendency to detour. The incentive mechanism of the parking ticket transfer and bus ticket transaction throughout the entire journey plays a significant role. Moreover, the commuters first consider the road ticket revenue when choosing a bus, and second, the commuting time factor. The road ticket transaction program based on road pricing plays an active role in the effective use of limited road resources. The research results can provide a theoretical basis for traffic management departments to formulate traffic management measures. 10 tabs, 8 figs, 27 refs.

Key words: traffic engineering; traffic congestion; tradable credit scheme; park and ride; travel mode; multinomial logit

0 引言

2011年Yang等首次提出“可交易电子路票方案”(tradable credit scheme, TCS)^[1], 该方案比国际上已实施的拥堵收费措施更具灵活性和优越性, 一经提出便成为学术界一个热点, 随之大量新的研究成果面世。在理论层面, 学者们从出行者异质、混合均衡、网络设计、交易费用等角度对可交易电子路票方案进行扩展研究。在考虑用户异质性上, Wang等考虑具有离散时间价值分布的多类用户情况, 建立了变分不等式来描述电子路票方案下的用户平衡和市场平衡条件, 结果表明, 合理的路票交易方案可以达到系统最优以及 Pareto 改进时的网络流量模式^[2]; Wu等分析了电子路票方案下, 收入对多模式网络中出行者出行生成的影响^[3]; Zhu等分析了多用户网络平衡问题, 并实现了 Pareto 改进^[4]。在混合均衡方面, Zhao等研究了用户均衡、古诺均衡以及市场均衡在内的3种路票交易方案^[5]; Fang等分析了当网络中存在有限量古诺均衡与无限量用户均衡出行者时的路票交易方案^[6]。他们证明了在忽略交易成本的情况下存在能够实现系统最优的非负匿名路票方案, 而在考虑交易成本时, 用户均衡的出行者出行成本将会提高, 而古诺均衡的出行者出行成本有可能减少。在网络设计方面, Wang等进行了

一系列研究, 将电子路票方案放入网络研究, 设计了上层以社会福利最大化、下层以出行广义成本最小化的双层模型, 并通过算例分析证明了所提模型在缓解交通方面更加有效^[7-9]。在交易费用方面, Nie研究了交易成本对路票市场的影响^[10]。在对交通瓶颈的管理方面, Xiao等研究了路票交易方案在早高峰通勤方面的作用^[11]; Nie等提出了一种基于时间窗的路票交易方案, 并将其应用于高峰时段瓶颈处, 研究结果表明, 这种机理简单、实施方便的路票交易方案在早高峰的交通管理中具有较强的有效性, 且能在保证一定公平性的前提下保证系统最优^[12]。Shirmohammadi等采用电子路票来管理瓶颈处的排队长度, 设定了一个关于最大排队长度的阈值, 利用路票交易手段使排队长度不得超过这一阈值^[13]。在对出行影响方面, Ye等研究了路票交易下的路票价格及旅行时间的动态变化, 采用动态模型描述了出行者的路径选择、学习行为以及路票价格的演化过程^[14]; Bao等从出行者心理角度分析了路票交易下的出行者损失规避行为, 引入了心理账户的概念, 通过算例分析发现, 心理账户下的需求及路票价格出现上涨, 同时路票扣除额度处于中位处的路径选择概率会更高^[15-16]; Tian等讨论了路票交易在竞争性公路上进行方式划分的效果, 结果表明, 当处于均衡条件时, 存在唯一的方式划分及路票

方案,且系统最优处的路票交易方案始终处于 Pareto 改进状态^[17]。在实证方面,Xu 等采用北京市的数据分析了路票交易对出行方式的影响,得出了路票交易可减少小汽车行程的结论^[18]。

停车换乘系统(park and ride,P & R)是中心区停车收费的辅助措施,是一种既不影响驾车便利性又鼓励出行者多使用公共交通的措施,也是经营成本较低的一种交通需求管理方式。在停车换乘选择行为方面,Hole 最早基于通勤出行者意愿,建立考虑停车换乘与驾车 2 种方式的二项 Logit 模型并分析选择 P & R 的影响因素^[19];Hess 建立了多项 Logit 模型来研究免费停车对通勤出行方式选择的影响^[20];秦焕美等考虑出行偏好性,以北京市 P & R 选择行为数据建立模型,进行了 P & R 选择行为研究^[21-22];云美萍等调查了上海市的停车换乘出行数据,并对通勤者出行选择行为进行了研究,结果表明通勤者更关注停车换乘的低时耗性,其次才是低费用^[23]。

本文通过分析现有文献,发现已有的关于路票交易的研究基本只考虑了 1 种或 2 种(驾车与公共交通)出行方式,且缺乏与其他经济手段相结合的研究,而停车换乘行为研究方面大多也只考虑了驾车与换乘 2 种方式。Botton 等曾提出将停车收费与拥堵收费等最优收费方案同时实施,以缓解交通拥堵^[24];李铁舜等研究了区域拥堵收费与停车换乘组合措施下的相关特性^[25]。然而停车换乘与路票交易相结合的研究目前尚未见报道。为此,本文结合停车换乘措施对多种通勤方式下的路票交易出行特性进行研究。根据组合措施特性构建多项 Logit 模型,采集上海市居民出行数据,着重分析在组合措施下影响出行者选择通勤方式的变量因子,分析在组合措施下,出行者居住位置、出行经济因子、出行耗时对出行者的通勤方式选择产生的影响,以期为交通管理部门制定合理的交通管理措施提供理论参考。

1 组合措施下出行选择模型构建

1.1 模型的基本假设

组合措施的本质是在实行以路段为计费单元的路票交易政策时,兼具考虑基于中心区停车收费的停车换乘系统对交通方式选择的诱导作用,将 2 种措施组合起来,研究不同特性人群面对不同效用的出行方式时的不同选择,符合非集计模型的条件。

非集计模型为非集计统计的产物,广泛应用于

个人行为的统计与分析中,其理论基础为经济学中的消费者需求理论及随机效用理论。本文以该理论为前提,给出以下假设。

(1)在单一的停车换乘措施下,出行者前往城市中心区域的出行有 3 种可供选择的行为,全程驾车、停车换乘、全程公共交通;在综合措施下,全程驾车前往市中心分为全程原路驾车和全程驾车绕路避费 2 种方式(城市道路状况复杂,出行者往往无法准确提前预知何时何处出现拥堵,错时避费十分困难,故本文舍弃提前预知道路拥堵选项)。

(2)出行者选择时是理性的,则根据效用最大化理论,效用函数值越大的出行方式越容易被选择。

(3)效用函数为可以量化的各因素的线性组合。

(4)为了突出研究出行者的个人属性、出行时间、出行费用等微观因素的影响,假设出行者所在区域能够非常便利的使用 P & R 设施,弱化了设施本身对选择结果的影响。

(5)效用函数的随机项均服从二重指数分布。

1.2 模型的确立

组合措施下出行者面临 3 种以上的选择方式,符合多项 Logit 形式。

假设出行者 n 出行选择方案集合为 A_n ,集合中可供选择方案为 J_n 个, $j=1,2,\dots,i+1,\dots,J_n$,出行者 n 选择第 j 个方案的效用为 U_{jn} 。假设出行者 n 选择第 i 个方案,其效用为 U_{in} ,则应满足条件为

$$U_{in} > U_{jn} \quad i \neq j, i, j \in A_n \quad (1)$$

$$U_{in} = V_{in} + \epsilon_{in} \quad (2)$$

$$U_{jn} = V_{jn} + \epsilon_{jn} \quad (3)$$

式中: V_{in} 、 V_{jn} 为确定项; ϵ_{in} 、 ϵ_{jn} 为随机项。

出行者选择方案 i 的概率 P 可以表述为

$$P_{in} = P(U_{in} \geq U_{jn} \quad i \neq j, i, j \in A_n) \quad (4)$$

式中: P_{in} 为出行者 n 选择方案 i 的概率, $0 \leq P_{in} \leq 1$, $\sum_{i \in A_n} P_{in} = 1$; $P(\cdot)$ 为概率函数。

设随机效用项满足假设(5),则可得出 Logit 模型形式为

$$P_{in} = \frac{e^{V_{in}}}{\sum_{j=1}^{J_n} e^{V_{jn}}} \quad (5)$$

在 Logit 模型求解中,首先要确定效用函数的确定项。确定项的确定必须满足以下条件:①需要包含绝大部分对选择行为可能产生影响的因素;②能够反映政策因素、服务水平等的影响;③能够通过数学公式表述;④确定项不宜过多,一般为 2~3

个^[26]。本文着重考察在组合交通需求管理措施下的个人属性、出行费用(包含停车费用、路票交易所得,可为负也可为正)以及出行时间等因素影响的显著性,其数学表达式为

$$V_{in} = \sum_{k=1}^K \beta_k X_{ink} \quad i \in A_n \quad (6)$$

式中: K 为影响因素总数; β_k 为待标定参数; X_{ink} 为出行者 n 选择第 i 个出行方式中的第 k 个影响因素。

由于基于路段的收费系统中,路票花费与选择方式具有较强的相关性,导致运行结果不收敛,故要先将其进行转换,统一转变成路票收益,作为出行经济因子。本次试验设计的选择方式为:①全程原路驾车直接前往市中心;②全程驾车选择绕路避费;③采用停车换乘方式;④全程采用公共交通方式。各经济因子计算公式为

$$C_1 = f_{t1} - f_p t_p \quad \text{选择方式①} \quad (7)$$

$$C_2 = f_{t2} - f_p t_p \quad \text{选择方式②} \quad (8)$$

$$C_3 = f_t - f_{pr} - f_s \quad \text{选择方式③} \quad (9)$$

$$C_4 = f_t - f_b \quad \text{选择方式④} \quad (10)$$

式中: C_1 为全程原路驾车经济因子; C_2 为绕路避费经济因子; C_3 为停车换乘经济因子; C_4 为全程公共交通经济因子; f_{t1} 、 f_{t2} 分别为选择方式①、②的路票交易所得; f_t 为选择方式③、④的路票交易所得; f_p 为市区单位时间停车费用(元/h); t_p 为市区停车时间(h); f_{pr} 为换乘停车场单次停车费用(元/次); f_s 为换乘地铁费用; f_b 为公共交通费用。

2 组合措施虚拟案例数据采集及分析

2.1 虚拟案例 SP 调查设计

由于路票交易并未在中国实施,故本文采用假设条件下的出行人出行意向调查(SP 调查)。具体调查内容如下所述。

(1)个人社会属性特征。主要包括:性别、年龄、工作性质、收入、居住地等。

(2)出行行为相关信息调查。主要包括:对 P & R 服务评价,采用停车换乘系统前往市中心区域的时间及费用,全程驾车前往市中心区域所需时间,市中心区域是否停车困难,需要的停车时间及停车场收费标准,全程公共交通前往市中心区域所需时间和费用。

(3)意向选择调查。由于基于路段的路票交易方案具有高度的灵活性,并且尚处于理论研究阶段,没有实际数据可供参考,故所需费用等试验数据本文根据试验取值。

本次调查对象为上海市有车的居民,因为这类人群对当地的交通感受最为直观真实,其所填问卷可信度高。由于本次调查问题较多、相对较复杂,上门访问调查难度大,故通过专业网络调查公司付费样本服务进行网络调查,收集数据。

为了显示组合措施带来的交通方式选择的变动,在最终选择方面特别设置了对比参照组,即单一的停车收费政策下的出行方式选择。假设有 3 种选项:①全程驾车前往市中心;②采用停车换乘系统换乘公共交通;③全程公共交通前往市中心。而组合措施下,基于路段的路票交易政策实质上将传统拥堵收费的经济惩罚机制转变为惩罚-奖励机制,额外增加了收益刺激,则选项全程驾车的出行效用也随之改变,前往市中心可分成全程原路驾车和全程驾车但选择绕路避费。

本文根据居民所能接受的票价并结合参考文献[27],从宏观层面设置路票收益与支出金额,在假设路径零阻抗的前提下,设置 OD 点分别为出行者居住地和以人民公园为中心点的市中心区域。参考文献[12],在高峰时间段进行电子路票控制,并鼓励绕路以避开拥堵路段,具体假设全程原路驾车前往市中心至少扣除 15 元路票费用,而绕路避费可获得最多 15 元路票收益,但增加至少 10 min 出行时间。最终选择方式如表 1 所示。

表 1 选择方式
Tab. 1 Type of choice

方式	措施
1	全程原路驾车,除支付停车费外还扣除不高于 15 元的路票费用
2	全程驾车,绕路避费,除支付停车费用外可额外获得最多 15 元路票收益,但出行时间增加至少 10 min
3	采用停车换乘方式,最多可获得 15 元路票收益,但需缴纳换乘停车的费用
4	全程采用公共交通方式,最多可获得 15 元路票收益

本文主要考察了微观因素对出行者选择行为的影响,具体包括:出行者性别、年龄、职业、收入、居住地区等个人属性,以及不同出行方式下的出行时间、费用、换乘停车的停车费用(上海市换乘停车收费以次计费)、对停车换乘的服务评价、市中心区域停车费用、需要停车时间、市中心区域停车是否困难等。

2.2 SP 调查统计结果分析

本次调查发出 300 份问卷收回 230 份,其中有效问卷 204 份。

2.2.1 工作出行者个人属性信息汇总

本次受访者中男性为 42%,女性为 58%,根据

不同职业工作出行时间的自由程度将职业大致分为 2 类:企事业单位人员、公务员以及公司职员 的固定职业;个体经营者、自由劳动者的自由职业。其中,固定职业占 96%,自由职业占 4%。这是由于调查对象设定在中心区域工作出行,故样本绝大多数为固定职业,这也说明样本工作通勤具有较强的规律性,是高峰时段出行的主要组成部分。按照工作出行者年龄特征分为 4 个阶段:20~29 岁,30~39 岁,40~49 岁,50~59 岁,占比分别为 29%、53%、12%、6%,样本年龄多集中在 30~39 岁,青壮年居多。居住地大部分在内环至中环,占比 40%;其次为中环以外,占比 36%;内环以内居住者较少,占比 24%,可见样本在城市中分布较为平均。工作出行者个人属性如表 2 所示。

表 2 工作出行者个人属性

Tab. 2 Personal characteristics of work commuters		
属性	分类	占比/%
性别	男	42
	女	58
年龄/岁	20~29	29
	30~39	53
	40~49	12
	50~59	6
职业	自由职业	4
	固定职业	96
年收入/万元	(0,10]	34
	(10,20]	46
	(20,30]	14
	(30,40]	3
	>40	3
居住位置	内环以内	24
	内环至中环	40
	中环以外	36

2.2.2 工作出行者出行特性分析

本次调查重点考虑出行者对停车换乘及市中心停车困难度的感受评价,结果如表 3 所示。

调查结果显示,出行者对上海的停车换乘系统服务评价一般,不存在特别偏好或相对抵触。对市中心停车是否困难的调查结果如表 4 所示。

表 3 出行者对停车换乘服务评价

Tab. 3 Evaluation of P&R service of work commuters			
评价等级	非常满意	一般	不满意
占比/%	32	65	3

调查结果表明,几乎所有驾车出行者都认为市中心区域停车困难。

此外,本文调查了平时工作出行者不同出行方

表 4 市中心停车是否困难调查

Tab. 4 Downtown parking difficulty

是否困难	是	否
占比/%	94	6

式的出行时间、市中心停车费用、市中心停车时间、停车换乘费用、停车换乘出行时间、公共交通出行时间及公共交通出行费用。根据式(7)~式(10)计算的 4 种出行方式的经济因子,在本文设定的虚拟情境下:全程原路驾车的路票额度不足,出行者需要另外购买路票额度,相对其他 3 种方式的路票交易所得,其数值为负,其经济因子为路票交易所得减去停车费用,数值依然为负;绕路避费中,路票交易所得为正,而大部分出行者的路票交易所得不足以抵消停车费用,故该出行方式的经济因子大部分数值为负,仅有少数数值为正;停车换乘中,路票交易所得为正,且多数出行者的路票交易所得足以扣除停车换乘费用,其数值大部分为正,仅有少数数值为负;全程公共交通中,路票交易所得为正,且足以抵消公共交通费用,故经济因子数值为正。如图 1~图 4 所示。

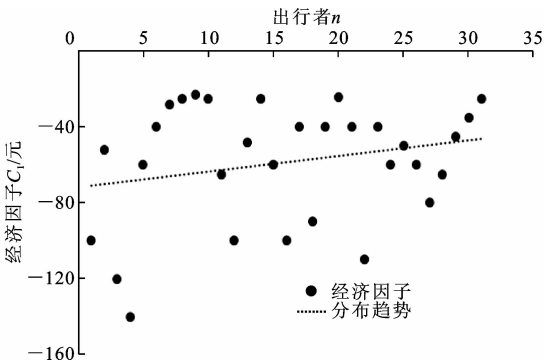


图 1 全程原路驾车经济因子散点图

Fig. 1 Economic factors scatter diagram when full driving

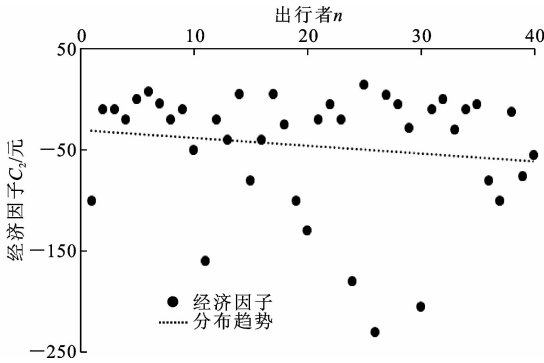


图 2 绕路避费经济因子散点图

Fig. 2 Economic factors scatter diagram when detour avoidance

从图 1~图 4 可以看出,按照本文设定的路票价额经计算得出,原路驾车、绕路避费出行的经济因

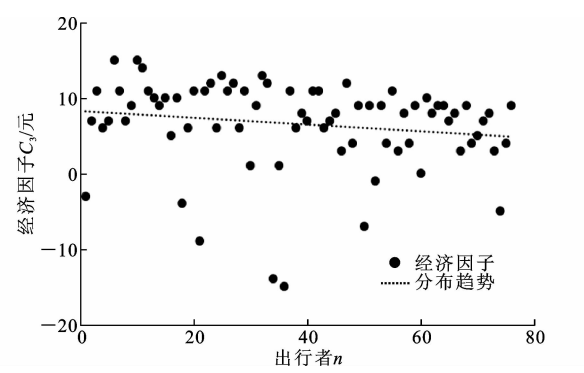


图 3 停车换乘经济因子散点图

Fig. 3 Economy factors scatter diagram when P & R parking

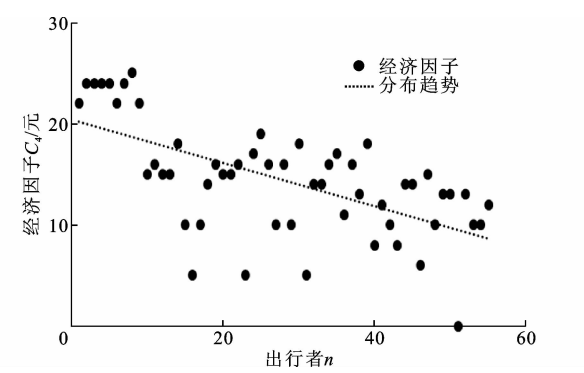


图 4 全程公共交通经济因子散点图

Fig. 4 Economic factors scatter diagram when choosing a bus

子为出行成本,停车换乘与全程公共交通的经济因子为出行收益。

2.2.3 工作出行方式选择分析

组合措施实施前后,工作出行方式选择对比如图 5 所示。组合措施实施后全程驾车分为:原路驾车(不绕路避开拥堵)、绕路避费驾车。从图 5 可看出,组合措施下,出行者选用停车换乘的数量略微下降,选择驾车前往市中心的数量有所上升,选择全程公共交通的数量有所下降。经过交叉分析可以得出组合措施下出行方式的变化状况,如图 6~图 8 所示。

由图 6 可知:在组合措施下,原来采用全程驾车的出行者仅剩 40%继续选择全程原路驾车,而有 31%的出行者选择绕路避费驾车,25%的出行者选择停车换乘,4%的出行者选择全程公共交通。由图 7 可知:原来采用停车换乘方式出行的仍有高达 62%的继续选择停车换乘;仅有 18%选择全程原路驾车,13%选择全程公共交通,另有 7%选择绕路避费。由图 8 可知:原来采用全程公共交通出行的仍有 64%继续选择全程公交,19%选择了停车换乘,11%选择绕路避费,仅有 6%选择全程原路驾车。

综上可见,路票交易奖励机制对全程驾车前往

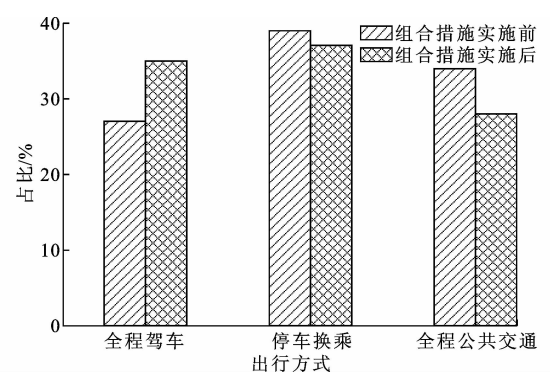


图 5 组合措施实施前后的出行方式选择对比

Fig. 5 Comparisons of travel mode choice before and after combined measures

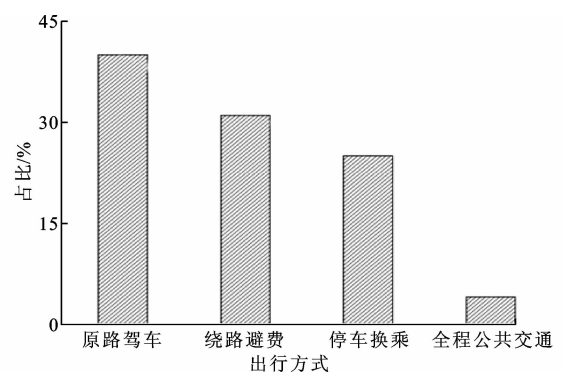


图 6 组合措施下原全程驾车方式的变化

Fig. 6 Changes of travel by cars under combined measures

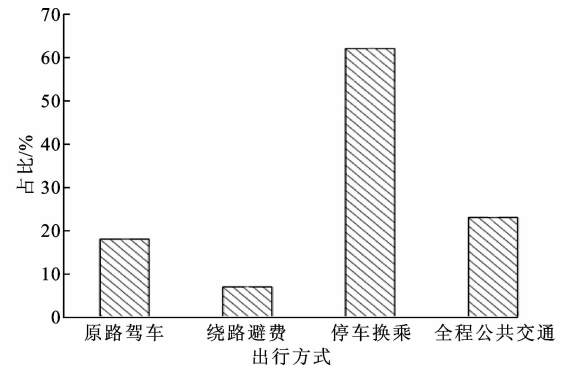


图 7 组合措施下原停车换乘方式的变化

Fig. 7 Changes of travel by P & R under combined measures

市中心区域的出行者作用最明显,其次为停车换乘方式,只有不到 40%的选择其他方式,且选择占比最多为全程公共交通。然而从整体上看,驾车出行比例整体上升而公共交通出行比例反倒下降,这与预期的组合措施下的需求管理目标存在冲突。其原因是由于设计选择方式时,在绕路避费中设置了奖励,以鼓励驾驶人绕路避费,避开拥堵路段;而绕路避费与公共交通出行奖励金额一致,这也从侧面说明,前往市中心的工作出行中,出行者对驾车出行具有一定偏好。

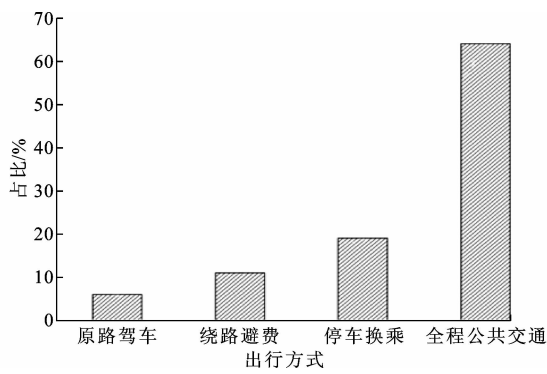


图 8 组合措施下原全程公交方式变化

Fig. 8 Changes of travel by bus under combined measures

3 组合措施下出行方式选择模型标定及检验

3.1 组合措施下出行数据分析

本文采用 Stata12 软件,模型运算前需对原始变量进行定义,变量有二分类变量、多分类变量和连续变量。为了使模型更接近实际,模型运算前先将分类变量进行哑元化处理;对多分类变量,当变量分类数为 $m(m>2)$ 时,通常设置分类数 $m-1$ 个哑元变量。自变量分类如下。

(1)性别,二分类变量,分为:男性(X_{m1})取 0、女性(X_{m2})取 1。

(2)年龄,多分类变量,分为:20~29 岁、30~39 岁、40~49 岁、50~59 岁,以 20~29 岁为参照组引入哑元变量,如表 5 所示。

(3)职业,二分类变量,分为:固定职业(X_{m6})取 1,自由职业(X_{m7})取 0。

(4)年收入(万元),多分类变量,分为:(0,10]、(10,20]、(20,30]、(30,40]、(40,+∞],以(0,10]为参照组引入哑元变量,如表 6 所示。

表 5 年龄哑元变量

Tab. 5 Age dummy variables

年龄/岁	哑元变量		
	X_{m3}	X_{m4}	X_{m5}
20~29	0	0	0
30~39	1	0	0
40~49	0	1	0
50~59	0	0	1

(5)居住地,多分类变量,分为:内环以内、内环至中环、中环以外,以内环以内为参照引入哑元变量,如表 7 所示。

(6)停车换乘服务评价,多分类变量,分为:非常满意、一般、不满意,以非常满意为参照引入哑元变

量,如表 8 所示。

表 6 年收入哑元变量

Tab. 6 Annual income dummy variables

年收入/万元	哑元变量			
	X_{in8}	X_{in9}	X_{in10}	X_{in11}
(0,10]	0	0	0	0
(10,20]	1	0	0	0
(20,30]	0	1	0	0
(30,40]	0	0	1	0
(40,+∞]	0	0	0	1

表 7 居住地哑元变量

Tab. 7 Location dummy variables

居住地	哑元变量	
	X_{m12}	X_{m13}
内环以内	0	0
内环至中环	1	0
中环以外	0	1

表 8 停车换乘服务评价哑元变量

Tab. 8 P&R service evaluation dummy variables

P & R 服务评价	哑元变量	
	X_{m14}	X_{m15}
非常满意	0	0
一般	1	0
不满意	0	1

(7)中心区停车是否困难,二分类变量,回答是(X_{m16})取 1,否(X_{m17})取 0。

(8)出行成本及收益,连续变量,分为:原路驾车出行成本(X_{m18})、绕路避费出行成本(X_{m19})、停车换乘出行收益(X_{m20})、全程公共交通出行收益(X_{m21}),采用调查值,由式(7)~式(10)计算得到。

(9)出行时间,连续变量,分为:原路驾车(X_{m22})、绕路避费(X_{m23})、停车换乘(X_{m24})、全程公共交通(X_{m25}),采用调查值。

3.2 组合措施下出行方式选择影响因素及预测结果分析

采用 Stata12 软件对模型参数进行标定,设置出行方式①为参照组,则模型标定结果如表 9 所示。表 9 中已去除影响因素不显著的结果,模型拟合优度比为 0.461 7,通常拟合优度比为 0.2~0.4 时表明模型拟合精度较高,拟合结果可以接受。_Cons₃、_Cons₄为常数项。从表 9 可看出,出行收益、出行时间以及居住地对选择方式的影响比较显著。对表 9 进行分析有如下结论。

(1)绕路避费的出行成本标定参数为-0.02,出

表 9 组合措施下选择出行方式模型参数标定结果

Tab. 9 Parameters calibration of travel mode choice under combined measures

种类	常数项		个人属性 哑元变量	出行方式特性变量				
			居住位置	出行成本	出行收益		出行时间	
	_Cons ₃	_Cons ₄	X _{in13}	X _{in19}	X _{in20}	X _{in21}	X _{in23}	X _{in25}
原路驾车	0	0	0	0	0	0	0	0
绕路避费	0	0	1	1	0	0	1	0
停车换乘	1	0	0	0	1	0	0	0
全程公共交通	0	1	0	0	0	1	0	1
标定参数	1.780	−0.258	−1.550	−0.020	0.130	0.271	0.040	0.048
P 值	0.010	0.031	0.027	0.000	0.000	0.000	0.005	0.008

行时间标定参数为 0.04,说明随着出行成本升高,相对全程原路驾车,出行者更偏向于多花时间绕路避费,且这 2 项解释变量达 95%以上的置信度。居住在中环以外对驾驶人选择绕路避费有显著影响,其中,中环以外对应的标定参数值为−1.55,对应的 P 值为 0.027,说明与内环以内的出行者相比,居住在中环以外的出行者更不愿意选择绕路避费,其解释变量有 95%以上的置信度。推测原因是居住地越远前往市区时间越长,出行者越不愿多花费时间绕行。

(2)出行收益对出行者选择停车换乘有显著影响。出行收益在停车换乘的标定参数值为 0.13,与全程驾车相比,偏向出行有高收益者更愿意选择停车换乘。

(3)出行收益与出行时间对出行者选择全程公共交通有显著影响。出行收益在全程公共交通的标定参数为 0.271,出行时间在全程公共交通的标定参数值为 0.048,说明出行者在选择公共交通出行时首要考虑出行收益因素,其次为出行时间因素,即在路票奖励机制下,路票交易的收益越高出行者越倾向公共交通出行,且长时间出行者更偏向于公共交通出行。此外,全程公共交通中路票收益的标定参数值大于停车换乘中相应变量的标定参数值,说明高收益对选择全程公共交通的影响程度大于选择停车换乘的影响程度。

综上所述,出行费用因子影响出行者选择出行方式,说明合理的奖罚制度可以鼓励出行者做出偏向于停车换乘及公共交通的出行选择。这一结论同样也解释了第 2 节调查结果出现公共交通比例降低、驾车出行比例增高的现象,是出行收益与出行成本差异化不明显导致的。

对模型进行二次运算,分析其预测结果,如表 10 所示。

表 10 模型预测结果

Tab. 10 Model prediction results %

出行方式	预测值	调查值	绝对误差
原路驾车	11.76	15.20	−3.44
绕路避费	20.10	19.61	0.49
停车换乘	38.24	37.25	0.99
全程公交	29.90	27.94	1.96

由模型预测结果与调查结果对比可知,模型预测绝对误差较小,预测精度较高,可用于交通出行方式的分担比例预测。

4 结 语

(1)设计了应用于高峰时段交通瓶颈管理的带有奖罚机制的路票交易方案,采用 RP 和 SP 的调查方法,采集上海市以中心区域为工作出行目的地的出行数据,分析了不同管理措施下的出行选择差异,建立多项 Logit 模型,量化分析了考虑路票交易及停车换乘等多种出行方式选择的影响因素,发现出行成本、出行收益、出行时间、居住位置对居民选择出行方式有显著影响。

(2)通过对模型各特性变量的影响显著性分析发现,不同于传统拥堵收费单一的惩罚机制,本文模型时间因素显著性大于出行费用因素,在路票交易与停车换乘的奖罚机制下,收益(费用)与出行时间的影响最为显著,并且收益(费用)的影响总体上大于时间的影响。因此,灵活地调控路票发行额度、扣除额度及控制路票价格是组合措施能够发挥最优效益的关键。

(3)对每种选择方式的影响因素进行比对分析得出,出行收益对选择停车换乘及公共交通方式的影响程度尤为显著,且大于时间因素,说明在路票交易的奖励机制发挥作用时有利于鼓励工作出行者选择公共交通出行。

(4)本文仅研究了假定一种收费额度下的出行选择方式划分,未能体现出出行者对路票收益与时间因素的敏感性。在后续研究中将对路票金额变化引起的各出行方式占比的变化幅度进行弹性分析。

参考文献:

References:

- [1] YANG Hai, WANG Xiao-lei. Managing network mobility with tradable credits[J]. Transportation Research Part B, 2011, 45: 580-594.
- [2] WANG Xiao-lei, YANG Hai, ZHU Dao-li, et al. Tradable travel credits for congestion management with heterogeneous users[J]. Transportation Research Part E, 2012, 48(2): 426-437.
- [3] WU D, YIN Y, LAWPHONGPANICH S, et al. Design of more equitable congestion pricing and tradable credit schemes for multimodal transportation networks[J]. Transportation Research Part B, 2012, 46(9): 1273-1287.
- [4] ZHU Dao-li, YANG Hai, LI Chang-min, et al. Properties of the multiclass traffic network equilibria under a tradable credit scheme[J]. Transportation Science, 2014, 49(3): 519-534.
- [5] ZHAO Hui, ZHANG Cui-ping, SUN Hui-jun, et al. Tradable credits for congestion management with mixed equilibrium behaviors[J]. November, 2012, 29(2012): 201211-544.
- [6] HE F, YIN Y, SHIRMOHAMMADI N, et al. Tradable credit schemes on networks with mixed equilibrium behaviors[J]. Transportation Research Part B, 2013, 57: 47-65.
- [7] WANG Guang-min, GAO Zi-you, XU Meng, et al. Models and a relaxation algorithm for continuous network design problem with a tradable credit scheme and equity constraints[J]. Computers & Operations Research, 2014, 41: 252-261.
- [8] WANG Guang-min, GAO Zi-you, XU Meng, et al. Joint link-based credit charging and road capacity improvement in continuous network design problem[J]. Transportation Research Part A, 2014, 67: 1-14.
- [9] 王广民, 高自友, 徐 猛, 等. 弹性需求下网络设计问题和电子路票问题研究[J]. 管理科学学报, 2015, 18(4): 38-48.
WANG Guang-min, GAO Zi-you, XU Meng, et al. The combined model and relaxation algorithm for continuous network design problem with the second-best credits charging under elastic demand[J]. Journal of Management Sciences in China, 2015, 18(4): 38-48.
- [10] NIE Y M. Transaction costs and tradable mobility credits[J]. Transportation Research Part B, 2012, 46(1): 189-203.
- [11] XIAO F, QIAN Z, ZHANG H M. Managing bottleneck congestion with tradable credits[J]. Transportation Research Part B, 2013, 56: 1-14.
- [12] NIE Y M, YIN Y. Managing rush hour travel choices with tradable credit scheme[J]. Transportation Research Part B, 2013, 50: 1-19.
- [13] SHIRMOHAMMADI N, YIN Y. Tradable credit scheme to control bottleneck queue length[J]. Transportation Research Record, 2016 (2561): 53-63.
- [14] YE Hong-bo, YANG Hai. Continuous price and flow dynamics of tradable mobility credits[J]. Transportation Research Part B, 2013, 57: 436-450.
- [15] BAO Yue, GAO Zi-you, XU Meng, et al. Tradable credit scheme for mobility management considering travelers' loss aversion[J]. Transportation Research Part E, 2014, 68: 138-154.
- [16] BAO Yue, GAO Zi-you, XU Meng. Traffic assignment under tradable credit scheme: An investigation considering travelers' framing and labelling of credits[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2016, 8(2): 74-89.
- [17] TIAN Li-jun, YANG Hai, HUANG Hai-jun. Tradable credit schemes for managing bottleneck congestion and modal split with heterogeneous users[J]. Transportation Research Part E, 2013, 54: 1-13.
- [18] XU M, GRANT-MULLER S. Trip mode and travel pattern impacts of a tradable credits scheme: A case study of Beijing[J]. Transport Policy, 2016, 47: 72-83.
- [19] HOLE A R. Forecasting the demand for an employee park and ride service using commuters' stated choices[J]. Transport Policy, 2004, 11(4): 355-362.
- [20] HESS D. Effect of free parking on commuter mode choice: Evidence from travel diary data[J]. Transportation Research Record, 2001(1753): 35-42.
- [21] 秦焕美, 关宏志, 李 洋. 大城市 P & R 系统选择行为调查初步分析——以北京市为例[J]. 交通运输工程与信息学报, 2004, 2(4): 77-83.
QIN Huan-mei, GUAN Hong-zhi, LI Yang. Analysis on the choice behavior survey of the P & R system in metropolis — A case study in Beijing, China[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2004, 2(4): 77-83.