

# 高铁运行影响下道路运输旅客选择概率变化特性研究

李传华<sup>1</sup>, 吴昊<sup>2</sup>

(1. 长安大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 为研究高铁运行对道路运输旅客选择概率变化特性, 建立了基于效用理论的道路运输旅客乘车概率计算模型并提出了求解计算方法, 模型描述了旅客对于道路运输及高铁衔接道路运输两类出行链的选择概率。通过某市部分出行群体调查数据为例获得模型参数, 根据模型绘制了出行总里程、高铁里程占比两个参数变化下乘客选择概率曲线, 分析了出行链部分参数变化时与双因素共同变化时旅客选择行为的变化趋势; 研究了道路运输票价下降和舒适性提升情况下, 对于选择概率影响。结果发现: 出行总里程、高铁里程对于出行链选择概率影响明显。随着出行链中高铁占比的增加, 旅客选择高铁出行的比例逐渐增加; 随着路线长度的增加, 选择高铁出行的比例逐渐下降。道路运输票价折扣对于在高铁在出行链中占比较大时对于选择概率的影响并不明显, 而舒适性提高对于概率的影响作用较为明显。上述结果反映了道路运输、高铁运输之间的竞争关系, 对于高铁运行影响下道路运输组织测量有借鉴作用。

**关键词:** 道路运输; 高铁; 旅客; 出行链; 选择行为; 效用理论

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)05-0741-08

## A study of the impact of high speed railway operation on the selection probability of road transport passengers

LI Chuanhua<sup>1</sup>, WU hao<sup>2</sup>

(1. School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In order to study the impact of high speed railway operation on the selection probability of road transport passengers, a travel mode selection probability calculation model was created based on utility theory together with its solution. This model described the passengers' selection probability of two travel chains which include travel on road or travel both on high speed rail and road. The travel group survey data in a city was calculated to obtain the parameter of the model and a curve which described the number of diverted passengers when the parameter varied. Besides, the trend of passengers' selection when a part of travel chain parameters changed was analyzed. Furthermore, the impact of diversion characteristics was investigated on the condition that the road transport fare decreased and the comfort was improved. The results showed that with the increase in the proportion of high speed trains in the travel chain, the proportion of passengers who choose to travel on high speed railways was also gradually increased. The proportion of high speed rail trips has declined with the increase in the length of the route. Decline in road transport fares has a significant impact on diversion, while improved comfort does not have a significant effect on diversion. The results above reflect the competition between road transport and high speed rail transport and they can be used as a reference for road transportation organizations under the influence of high speed railway operation.

**Key words:** Road transport, high-speed rail, passenger, travel chain, choice behavior, utility theory

近年来, 我国高速铁路技术取得巨大进步。随着高铁线路不断延伸, 城际之间旅客出行方式选择产生了巨大变化。高铁运行对于道路旅客分流作用十分明显。然而, 进一步调查表明, 各线路道路旅客数量减少比例并不一致。此外, 许多道路旅客运输企业试图通过调整服务水平、票价

策略希望吸引部分流量, 但实施效果不一, 造成了社会资源的浪费。因此, 高铁运行条件下对道路运输旅客出行选择的影响特性值得进一步研究, 以便从理论上解释客流变化原因, 为客流预测提供依据。

需要注意的是, 高铁影响下的出行选择行为

并非单纯是两种交通方式之间的比较. 实际情况下, 多种交通方式相互接驳构成出行链, 起讫点确定条件下的旅客出行选择是在多个出行链之间进行选择, 即从起点需经过一系列出行方式才能到达目的地<sup>[1]</sup>. 因此, 以出行链为对象对于中长距离旅客出行研究更具有实际意义.

国内外研究曾经对多种交通方式之间的选择行为进行过研究分析. David 等<sup>[2]</sup>通过研究出行链选择, 每个可供选择的出行链的效用受到个人和家庭特征的显著影响. Enjian 等<sup>[3]</sup>采用基于 RP/SP 相结合的调查数据建立 Nested-logit 模型, 以此预测某地高铁开通后原客运体系中各交通方式分担率的变化. Levin 等<sup>[4]</sup>建立了二项 Logit 模型, 分析了高铁与私人小汽车之间出行需求竞争关系. Lo 等<sup>[5]</sup>考虑乘客的换乘行为和非线性费用行为方式, 利用三层嵌套 Logit 模型描述在多方式公交网络中的旅客选择行为, 并利用该模型分析了竞争环境下不同企业的收益情形. Chen 等<sup>[6]</sup>以航空客运为背景研究顾客选择行为, 假设航线根据出发时间不同分为两个航班, 假设市场中只有三种顾客类型, 建立最优策略模型并给出航空公司最优收益策略. 吴海燕等<sup>[7]</sup>以 Logistic 回归模型为基础, 以换乘设施因素为重点, 建立一般站点换乘方式选择概率模型, 分析不同站点模型的异同, 提出模型的适用范围及其应用方向. 王云泽等<sup>[8]</sup>采用二项 Logistic 模型的方法研究互通式立交分流选择行为及其影响因素和影响程度, 建立驾驶人在互通式立交分流区分流选择行为的概率模型, 研究表明互通式立交分流选择行为受分流车辆运行速度、交通流量等多种因素综合作用的影响. 卞长志等<sup>[9]</sup>以离散选择理论为基础, 结合嵌套 Logit 模型分析旅客在长途出行中对交通方式的选择行为, 考虑客运公司的收益最大化为目标函数, 以不同客运公司的定价策略为决策向量, 针对城际铁路和公路长途客车在信息透明情况下的竞争问题构建了静态博弈模型, 并指出城际铁路和长途客车最优定价策略. 宗芳等<sup>[10]</sup>建立了 Logistic 形式的出行方式选择模型, 分析了公交提升策略对居民出行方式的影响. 栾坤等<sup>[11]</sup>通过研究通勤者出行方式, 发现通勤者倾向于在出行链约束下选择交通方式. 王孝坤等<sup>[12]</sup>通过问卷调查的方法采集数据, 建立联立多元 Logit 模型, 研究结果表明通勤者出行链类型选择和出行方式之间存在着显著的相互影响关系. 景鹏等<sup>[13]</sup>对城际出行行为进行分析, 从社会经济统计特征和心理因素两个

角度分析都市圈城际出行者对普通列车、高铁和长途汽车这三种方式的选择行为. 叶玉玲等<sup>[14]</sup>利用数学模型描述交通方式特性与旅客自身特性对城际旅客出行方式选择行为的动态交互影响. 芮海田等<sup>[15]</sup>建立了旅客中长距离出行方式选择行为度量模型, 分析旅客在中、长距离出行时出行方式选择的影响因素及影响过程, 发现出行距离、目的地城市等级等 9 个因素对高铁和民航出行方式选择具有较强的影响.

上述研究对于揭示出行方式选择与交通方式特性、个体特性因素之间的互动关系具有重要意义, 但研究多集中于出行方式之间的选择与比较, 对于高铁-道路运输构成的出行链研究较少, 此外, 也未见客运费、舒适性变化对出行链选择影响的探讨. 论文在建立道路运输、高铁衔接道路运输两种出行链选择模型的基础上, 分析当出行链参数不同时, 出行选择行为的变化规律, 此外, 进一步分析票价、舒适度等因素调整情况下对乘客分流的作用.

## 1 旅客出行方式选择模型构建及求解

### 1.1 旅客出行方式选择模型

采用基于随机效用的 Logit 模型表征乘客出行选择行为, 模型可表达为确定性效用和随机性效用两部分, 并且假设不可直接观测要素产生的效用概率变动项服从某种概率分布.

个体对出行交通方式的效用函数与旅客主体特性及交通方式服务特性相关, 可以用下式表示

$$U_{in} = U_{in}(P_{in}, A_{in}) \quad (1)$$

其中:  $U_{in}$  表示个体旅客  $n$  对出行方式  $i$  的效用函数,  $P_{in}$  表示个体旅客  $n$  的主观因素组成的主体特性向量;  $A_{in}$  为对于个体旅客  $n$  方式  $i$  的特性向量, 即出行方式带来的客观因素.

因此, 个体旅客  $n$  对交通方式  $i$  的效用可以进一步表示为

$$U_{in} = \sum_k \beta_{in}^k x_{in}^k + \mu_{in} + \sum_k \Delta \beta_{in}^k x_{in}^k \quad (2)$$

其中:  $x_{in}^k$  表示个体旅客  $n$  和运输方式  $i$  的第  $k$  个特性向量,  $\beta_{in}^k$  是该特征向量的系数;  $\mu_{in}$  是由不可直接观测要素产生效用的概率变动项;  $\Delta \beta_{in}^k$  是个体旅客  $n$  的个体效用与全体旅客平均效用的差参数.

记 OD 间可供旅客选择的交通工具集合为  $A_n$ , 旅客总会选择对自己来说效用最大的交通方式, 则个体旅客  $n$  选择交通方式  $i$  的概率

$$P_{in} = P[U_{in} \geq U_{fn}, f \neq i, f \in A_n, i \in A_n] \quad (3)$$

其中,  $U_m$  是运输方式  $i$  对旅客  $n$  的效用函数,  $U_{jn}$  是运输方式  $j$  对旅客  $n$  的效用函数. 可推导出基于随机效用理论的多项 Logit 模型, 该模型所表示的个体旅客  $n$  对该 OD 间交通方式  $i$  的选择概率  $P_{in}$  为<sup>[16]</sup>

$$\begin{cases} V_{in} = \sum_k \beta_{in}^k x_{in}^k \\ P_{in} = \frac{\exp(\lambda V_{in})}{\sum_i \exp(\lambda V_{in})} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  是与随机项  $\varepsilon_{in}$  的方差  $\sigma^2$  相对应的参数, 由于  $\lambda$  和系数向量不可分, 因此可假设为 1<sup>[17]</sup>. 此外, 在假设独立同分布的基础上, 公式(2)中的后两项可约去, 此情况下关于 A、B 两种出行方式的二元选择模型可表达为

$$P_{An} = \frac{\exp(V_{An})}{\exp(V_{An}) + \exp(V_{Bn})} \quad (5)$$

## 1.2 影响因素分析及其模型表达

影响出行选择的因素包括个体因素和交通方式因素. 其中, 个体因素包括收入、年龄、性别等; 交通方式服务特性相关因素主要包括经济性、快速性、便捷性、舒适性等<sup>[18-19]</sup>. 经济性是影响乘客出行方式选择的重要因素, 通常体现为票价; 快速性通常表现为乘客在途旅行消耗总时间; 便捷性以换乘与候车时间来衡量; 舒适性体现为乘客从疲劳中恢复所需的时间.

为比较道路运输与高铁衔接道路运输两种出行链, 对模型加以改进. 对上述个体对出行交通方式的效用模型改进, 对经济性、舒适性等指标予以量化.

(1)经济性. 乘客选择运输方式考虑到经济性因素时, 主要是直接以该运输方式的票价作为依据, 模型中以票价作为经济性衡量指标, 量化为下式

$$x_{jn}^1 = \sum_{i=1}^I R_i \times \alpha_i \times l_{\alpha d} \quad (6)$$

其中,  $x_{jn}^1$  表示个体旅客  $n$  选择第  $j$  种出行链的经济性指标值,  $i$  是构成出行链  $j$  的出行方式之一,  $I$  表示出行链中运输方式总数.  $R_i$  表示第  $i$  种运输方式运价率(元/人 \* km),  $\alpha_i$  表示出行链中第  $i$  种运输方式里程占总里程的比例,  $l_{\alpha d}$  为 OD 之间的总里程.

(2)快速性. 用送达时间作为标度, 送达时间即是旅客在途旅行时间, 与旅行距离、交通工具以及旅行速度有关, 量化过程如下式所示

$$x_{jn}^2 = \sum_{i=1}^I W \times \frac{\alpha_i \times l_{\alpha d}}{V_i} \quad (7)$$

其中,  $x_{jn}^2$  表示个体旅客  $n$  和第  $j$  种出行链的快速性变量的量化值,  $T_i$  为第  $i$  种运输方式在途旅行时间(h),  $V_i$  为第  $i$  种运输方式运行速度(km/h). 用时间价值系数将  $T_i$  转化为价值指标,  $W$  是旅客时间价值(元/h).

(3)便捷性. 采用间接旅行时间作为标度, 间接旅行时间是指旅客前往乘车点时间与候车时间之和, 用时间价值转换为价值性指标, 量化过程如下式所示

$$x_{jn}^3 = W \times t'_j \quad (8)$$

其中,  $x_{jn}^3$  表示个体旅客  $n$  和第  $j$  种出行链的方便性变量的量化值,  $t'_j$  表示出行链中旅客前往乘车点时间与候车时间之和.

(4)舒适性: 对于大多数旅客来说, 旅客乘坐某种交通工具之和, 会产生一个恢复疲劳的时间, 恢复疲劳时长随着乘坐的交通工具以及旅行时长的变化而变化, 一般可以用下式计算旅行时间

$$t_i = \frac{\alpha_i \times l_{\alpha d}}{V_i} \quad (9)$$

其中,  $t_i$  表示采用第  $i$  种运输方式的旅行时间(h), 将恢复疲劳时间转化为价值性指标, 量化过程如下式所示<sup>[20-22]</sup>

$$x_{jn}^4 = \sum_{i=1}^I \frac{T_r}{1 + \varphi_i e^{\delta_i t_i}} \quad (10)$$

其中:  $x_{jn}^4$  表示个体旅客  $n$  和第  $j$  种出行链的舒适性变量的量化值;  $\varphi_i$ 、 $\delta_i$  为第  $i$  种运输方式的舒适性待定参数;  $T_r$  为极限恢复疲劳时间, 文献[20]中提出: 机体恢复正常状态所需时间与能量代谢大小、劳动时间的长短相关, 提出单一出行交通方式下 5 min 恢复时间下行为持续时间模型, 但是, 出行者的出行交通方式往往不单一, 需要不同公共交通之间进行换乘, 且模型参数应随出行者年龄、性别等的改变而改变; 本文以上述文献[20]提出的理论为指导, 参考上述文献[20-22]中舒适性量化模型, 对模型参数进行确定, 适用条件为:

1) 不考虑行为过程中出行心理要求, 即出行者的心理因素不会影响其生理承受能力.

2) 行为主体的年龄范围为 16~50 岁, 16~50 岁各年龄段的出行者生理负荷阈值相当.

选择道路旅客运输出行链对乘客产生的效用

$$U_1(\alpha) = \beta_1 x_{jn}^1 + \beta_2 x_{jn}^2 + \beta_3 x_{jn}^3 + \beta_4 x_{jn}^4 \quad (11)$$

选择高铁接驳道路运输出行链对乘客产生的效用

$$U_2(\alpha) = \beta_1 x_{jn}^1 + \beta_2 x_{jn}^2 + \beta_3 x_{jn}^3 + \beta_4 x_{jn}^4 \quad (12)$$

则乘客对两种出行链的选择概率分别为

$$P_{1n} = \frac{e^{U_1(a)}}{e^{U_1(a)} + e^{U_2(a)}} \quad (13)$$

$$P_{2n} = \frac{e^{U_2(a)}}{e^{U_1(a)} + e^{U_2(a)}} \quad (14)$$

### 1.3 模型求解方法

模型求解过程包括: 首先确定旅客出行链集合, 文中出行链有两种, 一种为道路运输, 另一种为高铁-道路运输接驳出行链; 其次, 选择出行链服务特性变量, 本文选择的出行链服务特性变量分别为经济性、快速性、方便性、舒适性; 接着设定参数; 最后分别计算旅客对两类出行链的选择概率, 计算流程如图1所示。

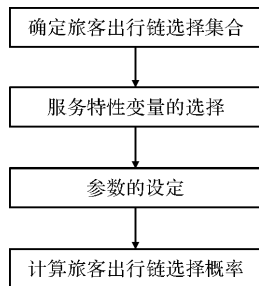


图1 选择模型计算步骤

Fig. 1 Select model calculation steps

当新的出行方式出现后, 乘客会根据效用值选择, 当计划出行的 OD 之间出现高铁运输时, 就会有一部分乘客从公路客运分流而采用高铁-道路运输接驳的出行方式。

特性变量包括交通方式的服务特性变量和旅客主体特性变量两个部分。服务特性变量和旅客主体特性变量的量化处理是计算过程中的关键步骤, 因为乘客在途时间、票价、舒适度以及乘客的购买力等计量单位不同, 为了方便计算以及表示, 通常将各特性变量值折合为货币形式, 从而计算出乘客出行的广义总费用。

在多项式中  $\beta_m^k$  是待定参数, 可理解为第  $k$  个特性变量值对个体旅客  $n$  选择交通方式  $i$  的影响程度的大小, 亦即第  $k$  个特性变量参与计算交通方式  $i$  对个体旅客  $n$  所产生的效用的权重。

利用调查数据根据不同交通方式的运行速度, 带入服务特性量化模型即可得到服务特性量化值, 进而采用最大似然估计法, 二元 Logit 模型的最大似然估计求解过程如下:

(1) 定义指示变量

$$y_{in} = \begin{cases} 1, & \text{样本 } n \text{ 选择 } i \text{ 出行链} \\ 0, & \text{样本 } n \text{ 选择 } j \text{ 出行链} \end{cases}$$

定义似然函数  $\zeta$ , 表达式为

$$\zeta(\beta_1, \beta_2 \cdots \beta_k) = \prod_{n=1}^N P_n(i)^{y_{in}} P_n(j)^{y_{jn}} \quad (15)$$

其中,  $N$  表示样本数量, 随机抽样条件下, 整个样本的似然率是个体观测值似然率的乘积。

(2)  $\zeta^*$  为  $\zeta$  的对数形式, 于是有

$$\zeta^*(\beta_1, \beta_2 \cdots \beta_k) = \sum_{n=1}^N [y_{in} \log P_n(i) + y_{jn} \log P_n(j)] \quad (16)$$

利用  $P_n(j) = 1 - P_n(i)$  的关系, 有

$$\zeta^*(\beta_1, \beta_2 \cdots \beta_k) = \sum_{n=1}^N \{y_{in} \log P_n(i) + y_{jn} \log [1 - P_n(i)]\} \quad (17)$$

通过对  $\zeta^*$  关于向量  $\vec{\beta}$  的每个分量求偏导, 并令所有偏导为 0, 将得到  $\zeta^*$  最大化的解。

$$\max \zeta^*(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2 \cdots \hat{\beta}_k) \quad (18)$$

$$\frac{\partial \zeta^*}{\partial \beta_k} = \sum_{n=1}^N \left\{ y_{in} \frac{\partial P_n(i) / \partial \hat{\beta}_k}{P_n(i)} + y_{jn} \frac{\partial P_n(j) / \partial \hat{\beta}_k}{P_n(j)} \right\} = 0 \quad (19)$$

似然函数是全局凹的, 因此解是唯一解, 最大似然估计的计算利用 Newton-Raphson 寻优算法实现。

通过对陕西省关中地区某市的小规模调查数据, 通过似然估计获得系数向量。由于论文重点在于对比两种方式的选择差异, 根据公式(13)和(14)特性, 去除个体特性并计算概率值, 以分析总体呈现出的选择概率变化规律, 计算结果如表1所示。

## 2 高铁运行对旅客出行链选择概率的影响特征

### 2.1 参数选择

研究出行链长度、方式占比变化情况下, 出行链选择概率的变换情况, 以此反映出行链参数对于选择行为的影响作用。文中出行链1指道路客运, 出行链2指高铁衔接其他道路运输, 乘客在出行链2中途换乘, 两种交通工具行驶里程之和等于总行驶里程。

主要参数包括  $\alpha$  和  $\beta$ ,  $\alpha$  表示道路客运占出行链2总里程的比例, 若高铁和道路客运各占一半则  $\alpha = 0.5$ ;  $\beta$  表示组合出行链2与基准里程的比值, 其中基准里程数取 1 000 km, 即出行链2为 1 500 km 时  $\beta = 1.5$ 。客运班车平均时速为 100 km/h, 高铁平均时速为 250 km/h, 出行链1的换乘时间以及等待时间总计取 0.5 h, 出行链2的换乘时间以及等待时间取 1 h。

表 1 二元 Logit 模型参数估计

Tab. 1 Parameter estimation of binaryLogit model

	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$
服务特性	经济性	快速性	便捷性	舒适性
估计参数值	-0.065	-0.007 34	-0.025 1	-0.013
$t$ 值	-4.142	-2.377	-4.755	-3.397

2.2 高铁里程占比对出行链选择概率的影响

高铁在出行链中的空间占比会影响旅客对出行链的选择行为, 在  $\alpha$  由 0 到 1 变换的情况下, 分析对旅客出行链选择行为的影响, 此时  $\beta = 1$ .

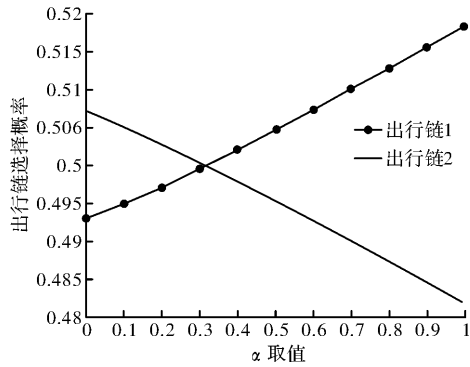


图 2  $\alpha$  对选择概率的影响

Fig. 2  $\alpha$  effect on selection probability

由图 2 可以看出, 在两个出行链的总里程不变的情况下, 出行链 2 具有一定优势, 随着客运班车行驶里程在总里程所占比例的增加, 出行链 2 的效用发生变化, 造成出行链 1 选择概率趋势递增, 出行链 2 的概率逐渐递减, 二者之和保持为 1. 也就是说, 在高铁比例减小时, 选择出行链 1 的概率逐渐增加. 在某一点上, 出行链 1 概率超过出行链 2. 另一方面, 还可以发现两者总体概率差异并不大, 说明对于调查旅客, 个人因素对于选择依然具有较大影响力, 道路运输仍具有一定的竞争力.

2.3 出行总里程对出行链选择概率的影响

出行总里程会通过影响旅客的出行时间及疲劳影响旅客对出行链选择行为, 设出行链 1 保持基准里程不变, 研究出行链 2 总里程变化情况下, 即  $\beta$  变化情况下对旅客出行链选择行为的影响. 此时出行链 2 的  $\alpha$  值设定为 0.5.

由图 3 可以看出, 当  $\beta$  的取值增加时, 出行链 1 选择概率逐渐增加, 出行链 2 选择概率逐渐减小. 在出行链 2 总里程增加的情况下, 选择出行链 1 的可能性上升, 且概率变化斜率较大. 说明出行里程对于出行链选择的影响较为明显.

2.4 双因素作用对出行链选择概率的影响

由上述分析可知, 高铁里程占比和出行总里

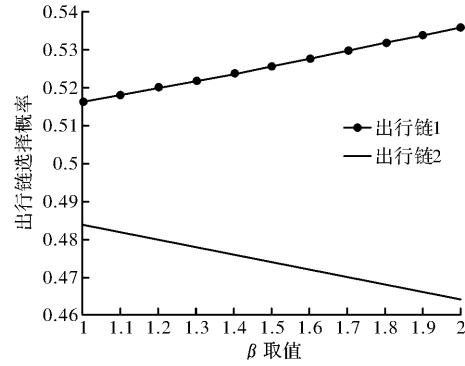
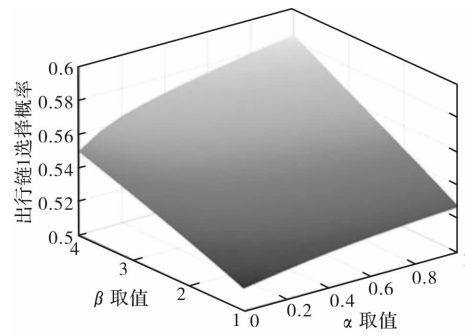


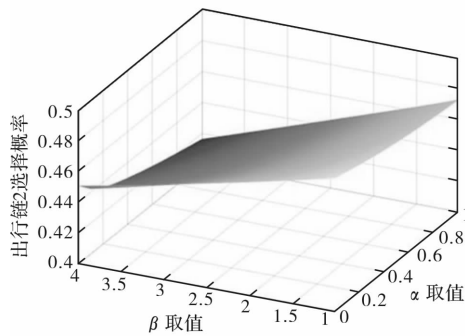
图 3  $\beta$  对选择概率的影响

Fig. 3  $\beta$  effect on selection probability

程对旅客出行链选择行为均有影响. 为了更加全面准确地分析这两种因素对旅客出行链选择行为的影响机理, 分析  $\alpha$  和  $\beta$  双因素共同作用下, 旅客出行链选择的变化趋势.



(a) 双因素变化下出行链1选择概率变化图



(b) 双因素变化下出行链2选择概率变化图

图 4 出行链选择概率变化图

Fig. 4 Travel chain selection probability change graph

从图 4 可以看出, 当  $\alpha$ 、 $\beta$  共同作用时, 对于出行链 1 的选择概率作用更为明显, 相比于  $\alpha$ 、 $\beta$  增长对于出行链 1 的影响影响更为明显.

### 3 道路客运特征对出行链选择的影响特征

#### 3.1 道路客运票价对旅客出行链选择行为的影响

从总体上分析当票价发生浮动时,对于当前旅客群体的影响。特别是当道路旅客运输票价浮动情况下,对于出行链选择的影响特性。图5是当道路客运票价75折和5折情况下,选择概率的变化情况。

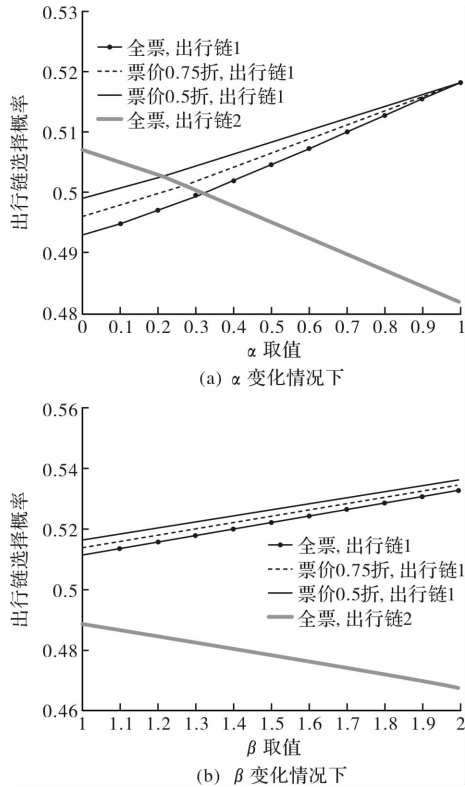


图5 道路客运票价折扣对出行链选择概率的影响

Fig. 5 Impact of road passenger fare discount on travel chain selection probability

可以发现票价折扣对于道路客运具有一定影响,折扣票价下出行链1的曲线更具有优势。此外,当出行链2高铁占比较高时,客运降价产生的作用较大。但任然无法改变出行链2高于出行链1的状况。在 $\alpha$ 变化情况下,票价的折扣作用逐渐递减; $\beta$ 变化情况下,影响比较均匀。说明票价策略在道路运输具有一定竞争力的情况下,即两出行链概率接近时能起到一定作用。

#### 3.2 道路客运舒适度对旅客出行链选择行为的影响

出行链2中高铁的舒适度通常高于出行链1的道路旅客运输,道路运输业也可通过提高平顺性、空调系统、车型、乘坐环境等来改善舒适度。论文对于道路运输舒适度参数 $T_r$ 改变时,出行选择

概率变化趋势进行研究。

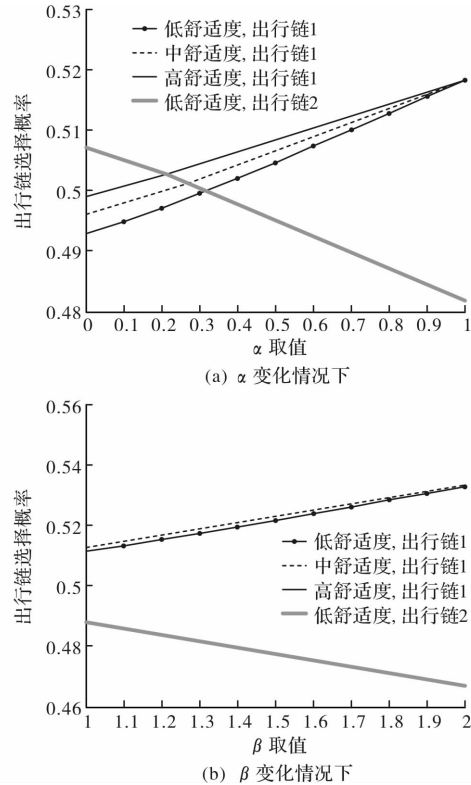


图6 道路客运舒适度提高情况对出行链选择概率的影响

Fig. 6 Impact of road passenger comfort improvement on travel chain selection probability

为了评价道路旅客运输舒适度对出行链选择行为的影响,论文选取影响模型中舒适度分别恢复时间为原有 $T_r$ 时间的0.75倍、0.5倍,如图6所示。从图6可以看出,在 $\alpha$ 取值较小时,乘客选择出行链的概率曲线影响越大,且影响变化较大;随着 $\alpha$ 的增加影响力逐渐减小。当 $\beta$ 取值增加时,乘客选择出行链的概率曲线较为相近,但是对于出行链1来说,舒适度值高的曲线靠上方,可见道路客运舒适度越大,乘客选择出行链1的概率越大,但是影响并不明显。上述数据说明,在当前参数设置情况下,提升舒适度(如更换小车),对于提高选择概率并不明显。

### 4 结论

通过建立出行链选择模型,研究参数与相关因素变化情况下,对于道路运输、高铁接驳道路运输两类出行链选择概率的特性,获得以下结论:

(1)高铁里程占比在对于出行链选择的作用非常大,在高铁比例较大时,选择出行链2的概率占优。出行总里程对于出行链选择的影响也非常明显。当出行链2的里程增加时,选择道路运输的概率持续增加。

(2)票价折扣对于道路客运选择概率具有积极影响,当出行链2高铁占比较大时,客运降价可产生一定作用。在 $\alpha$ 变化情况下,票价的折扣作用逐渐增加; $\beta$ 变化情况下,对于选择效率的增加不具有叠加的效应。说明在道路运输具有一定竞争力的情况下,才能起到一定作用。提高舒适度对于道路客运选择概率也具有一定作用。在 $\alpha$ 取值较小时,乘客选择出行链的概率曲线影响越大,且影响变化较大;随着 $\alpha$ 的增加影响力趋于平稳。当 $\beta$ 取值增加时,乘客选择出行链的概率曲线较为相近。上述数据说明,在当前参数设置情况下,提升舒适度(如更换小车),对于提高选择概率具有影响不明显。

(3)上述结论说明,道路运输票价调整和舒适度的变化对于出行选择具有一定影响,但是对于高铁占比较大时,依然选择出行链2的概率较大,只有在高铁占比稍小时才能对选择行为产生影响。道路运输可根据上述特性,适当调整线路、车型、票价与服务水平,与高铁运输形成相互接驳、相互服务、良性竞争的局面。

## 参考文献 References

- [1] 褚浩然,郑猛,杨晓光. 出行链特征指标的提出及应用研究[J]. 城市交通, 2006, 4(2):64-67.  
ZHU Haoran, ZHENG Meng, YANG Xiaoguang. Proposal and application of traveling chain characteristic indexes[J]. City Traffic, 2006, 4(2): 64-67.
- [2] HENSHER D A, REYES A J. Trip chaining as a barrier to the propensity to use public transport [J]. Transportation, 2000, 27(4):341-361.
- [3] ENJIAN Y, MORIKAWA T, KURAUCHI S. A study on nested logit mode choice model for intercity high-speed rail system with combined RP/SP data [C]//Traffic and Transportation Studies (Proc. Of ICTTS 2002). Guilin:ASCE, 2002.
- [4] LEVIN L, GELFAND M. Will the high-speed train compete against the private vehicle? [J]. Transport Reviews, 2004, 24(3):293-316.
- [5] LO H, YIP C, WAN Q. Modeling competitive multi-model transit services: a nested logit approach [J]. Transportation Research C, 2004, 27(12):251-272.
- [6] CHEN S X, GALLEGGO G. Optimal seat allocation for two-flight problems with a flexible demand segment [J]. European Journal of Operational Research, 2010, 201(3):897-908.
- [7] 吴海燕,蔡雅彤. 轨道交通一般一般站点换乘方式选择概率模型研究[J]. 交通与运输, 2014(2):47-51.  
WU Haiyan, CAI Yazhen. Study on the probability model of general transfer mode selection for rail transit [J]. Traffic and Transportation, 2014(2):47-51.
- [8] 王云泽,潘兵宏. 互通式立交分流选择行为概率模型研究[J]. 公路交通科技, 2014(31):104-109.  
WANG Yunze, PAN Binghong. Study on probability model of interchange selection behavior of interchange [J]. Journal of Highway and Transportation, 2014 (31):104-109.
- [9] 卞长志,陆化普. 城际铁路和公路长途客运的定价博弈[J]. 交通运输系统与信息, 2010, 10(1):184-189.  
BIAN Changzhi, LU Huapu. Pricing game of intercity railway and highway long-distance passenger transport [J]. Transportation Systems and Attention, 2010, 10 (1):184-189.
- [10] 宗芳,隽志才. 基于活动的出行方式选择模型与交通需求管理策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37 (1):48-53.  
ZONG Fang, ZHAI Zhicai. Activity-based travel mode selection model and traffic demand management strategy [J]. Journal of Jilin University, 2007, 37 (1): 48-53.
- [11] 栾琨,隽志才,宗芳. 通勤者出行方式与出行链选择行为研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(6):107-111.  
LUAN Kun, JUN Zhicai, ZONG Fang. Research on commuter travel mode and travel chain choice behavior [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(6): 107-111.
- [12] 王孝坤,饶秋丽,唐春艳. 通勤者出行链类型与出行方式选择的相互影响[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(2):144-149.  
WANG Xiaokun, RAO Qiuli, TANG Chunyan. Interaction between commuter travel chain types and travel mode choices [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and, 2014, 14(2): 144-149.
- [13] 景鹏,隽志才,查奇芬. 扩展计划行为理论框架下基于MIMIC模型的城际出行行为分析[J]. 管理工程学报, 2016, 30(4):61-68.  
JING Peng, JUN Zhicai, CHA Qifen. Analysis of intercity travel behavior based on MIMIC model under the framework of extended plan behavior theory [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2016, 30(4): 61-68.
- [14] 叶玉玲,陈鹏超,程正. 基于双参数的城际旅客出行方式动态仿真方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(6):859-865.  
YE Yuling, CHEN Pengchao, CHENG Zheng. Dynamic Simulation Method of Intercity Passenger Travel Mode Based on Two Parameters [J]. Journal of Tongji

- University(Natural Science), 2015, 43(6): 859-865.
- [15] 芮海田, 吴群琪. 高铁运输与民航运输选择下的中长途出行决策行为[J]. 中国公路学报, 2016, 29(3): 134-141.
- RUI Haitian, WU Qunqi. Decision-making behavior of medium and long distance travel under the choice of high-speed rail transportation and civil aviation transportation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(3): 134-141.
- [16] 史峰, 邓连波, 霍亮. 铁路旅客乘车选择行为及其效用[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(6): 117-121.
- SHI Feng, DENG Lianbo, HUO Liang. The choice behavior and effectiveness of railway passengers' cars[J]. China Railway Science, 2007, 28(6): 117-121.
- [17] 干宏程. 交通信息与出行者路线选择[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- GAN Hongcheng. Traffic information and traveler route selection [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [18] 李颖. 中国铁路旅客出行选择行为研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- LI Ying. Research on traveling choice behavior of Chinese railway passengers[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [19] 杨金云. 轨道交通方式服务水平的用户感知[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- YANG Jinyun. User perception of channel traffic mode service level [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [20] 孙朝苑. 客运专线对沿线城市铁路客运量分流问题的研究[J]. 铁道经济研究, 2004(3): 44-46.
- SUN Chaoyuan. Research on passenger traffic line diversion of urban railway passenger traffic volume along the line[J]. Railway Economic Research, 2004(3): 44-46.
- [21] 郭寒英. 基于出行者生理心理的城市客运交通出行行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- GUO Hanying. Research on Urban Passenger Transportation Travel Behavior Based on Traveler's Physiology and Psychology[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [22] 丁卫东. 用多目标决策方法研究公、铁客运合理分流[D]. 成都: 西南交通大学, 1991: 20-21.
- DING Weidong. Using multi-objective decision-making method to study the rational diversion of public and railway passenger transport [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1991: 20-21.

(编辑 沈 波)

(上接第 687 页)

- [7] SABOURI-GHOMI S, SAJJADI S R A. Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and without stiffeners [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 75(7): 152-159.
- [8] 赵伟, 杨强跃, 童根树. 钢板剪力墙加劲肋刚度及弹性临界应力研究[J]. 工程力学, 2010, 27(6): 15-23.
- ZHAO Wei, YANG Qiangyue, TONG Genshu. Stiffener stiffness and elastic buckling stress of steel plate shear wall [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(6): 15-23.
- [9] 郭彦林, 董全利, 周明. 防屈曲钢板剪力墙滞回性能理论与试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(1): 31-47.
- GUO Yanlin, DONG Quanli, ZHOU Ming. Tests and analysis on hysteretic behavior of buckling-restrained steel plate shear wall[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(1): 31-47.
- [10] 钢铁研究总院. 金属材料室温拉伸试验方法: GB/T228.1-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- Central Iron & Steel Research Institute. Metallic materials; tensile testing at ambient temperature; GB/T228.1-2010 [S]. Beijing: China Standards Press, 2010.
- [11] 钢铁研究总院. 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T2975-1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- Central Iron & Steel Research Institute. Steel and steel products; location and preparation of test pieces for mechanical testing; GB/T2975-1998 [S]. Beijing: China Standards Press, 1998.
- [12] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震试验方法规程: JGJ (101-96)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- China Academy of Building Research. Specification of testing methods for earthquake resistant building; JGJ (101-96)[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [13] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- China Academy of Building Research. Code for seismic design of buildings; GB 50011-2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

(编辑 沈 波)