

文章编号:1671-1637(2012)02-0076-08

## 出行方式与出发时间联合选择的分层 Logit 模型

杨励雅<sup>1</sup>, 邵春福<sup>2</sup>, HAGHANI A<sup>3</sup>

(1. 中国人民大学 公共管理学院, 北京 100872; 2. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044;  
3. 马里兰大学 土木与环境工程系, 马里兰 帕克 20742)

**摘要:**基于随机效用最大化理论,选取出行者特征、行程特性与出行方式服务水平作为效用变量,以出行方式与出发时间作为选择肢,构建了出发时间位于下层与出行方式位于下层的2种居民出行NL模型。分析了北京市居民出行样本数据,并模拟了在早高峰时段对小汽车出行收取费用时,小汽车出行者出行行为的变化。计算结果表明:与传统MNL模型相比,NL模型具有更好的统计学特征,调整后的拟合优度由0.338增大至0.404;在2种NL模型中,出发时间位于下层的结构对样本数据的适应性更强;当早高峰时段小汽车出行收取费用为5元时,72.6%的小汽车出行者坚持原有出行方式与出发时间,22.4%的小汽车出行者坚持小汽车方式,但会改变出发时间,4.8%的小汽车出行者改用公共交通方式,但出发时间不变,仅0.2%的小汽车出行者同时改变出行方式与出发时间;当收取费用为10元时,51.7%的小汽车出行者坚持原有出行方式与出发时间,40.4%的小汽车出行者坚持小汽车方式,但会改变出发时间,7.9%的小汽车出行者改用公共交通方式,但出发时间不变;当收取费用为20元时,27.5%的小汽车出行者坚持原有出行方式与出发时间,60.6%的小汽车出行者坚持小汽车方式,但会改变出发时间,11.9%的小汽车出行者改用公共交通方式,但出发时间不变。

**关键词:**交通需求管理;出行方式;出发时间;联合选择;NL模型;MNL模型;效用变量;高峰收费  
**中图分类号:**U491.1 **文献标志码:**A

### Nested logit model of combined selection for travel mode and departure time

YANG Li-ya<sup>1</sup>, SHAO Chun-fu<sup>2</sup>, HAGHANI A<sup>3</sup>

(1. School of Public Administration and Policy, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Department of Civil and Environment Engineering, University of Maryland, Park 20742, Maryland, USA )

**Abstract:** Based on the maximum random utility theory, traveler characteristic, travel characteristic and the service level of travel mode were taken as utility variables, travel mode and departure time were taken as alternative parts, and two nested logit(NL) models were built, one structure with departure time located in lower layer and another structure with travel mode located in lower layer. The sample data of resident travel in Beijing City were analyzed, and the travel behavior changes of car travelers were simulated when different car travel costs were charged in morning peak period. Calculation result shows that compared with traditional MNL model, there is better statistic characteristic in NL model. After adjustment, the goodness of fit increases from 0.338 to 0.404. In the two NL models, the structure with departure time located in lower layer has stronger adaptability on sample data than the structure with travel mode

收稿日期:2011-11-26

基金项目:国家973计划项目(2012CB725403);国家自然科学基金项目(50808174);国家985工程优势学科创新平台项目

作者简介:杨励雅(1978-),女,安徽阜阳人,中国人民大学讲师,工学博士,从事城市交通规划研究。

located in lower layer. While car travel cost in morning peak period is 5 yuan, 72.6% of car travelers will still insist on original travel mode and departure time, 22.4% of car travelers will still insist on original travel mode, but will change departure times, 4.8% of car travelers will turn to public transit, but will still insist on original departure time, and only 0.2% of car travelers will change travel mode and departure time simultaneously. While car travel cost in morning peak period is 10 yuan, 51.7% of car travelers will still insist on original travel mode and departure time, 40.4% of car traveler will still insist on original travel mode, but will change departure times, and only 7.9% of car travelers will turn to public transit, but will still insist on original departure time. While car travel cost in morning peak period is 20 yuan, 27.5% of car travelers will still insist on original travel mode and departure time, 60.6% of car travelers will still insist on original travel mode, but will change departure times, and only 11.9% of car travelers will turn to public transit, but will still insist on original departure time. 6 tabs, 3 figs, 22 refs.

**Key words:** traffic demand management; travel mode; departure time; combined selection; NL model; MNL model; utility variable; peak charge

**Author resume:** YANG Li-ya(1978-), female, lecturer, PhD, +86-10-62514875, liya\_yang@263.net.

## 0 引言

居民出行方式的选择在很大程度上决定了城市交通的结构,是反映城市交通系统效率的关键因素,因而一直是出行行为领域的研究热点。Palma 等研究了瑞士首都日内瓦居民工作出行的选择方式,通过模型计算发现个人(家庭)的社会经济属性是影响居民工作出行的核心因素<sup>[1]</sup>;Bharat 等利用多项 Logit(Multinomial Logit, MNL)模型分析了挪威居民出行方式的选择行为,并指出 MNL 模型在预测出行方式选择时可能存在的局限<sup>[2]</sup>;Limtanakool 等研究了影响荷兰居民在中长距离出行选择方式的 因素,发现个人(家庭)的社会经济属性、土地利用与出行时间均是影响选择方式的重要因素<sup>[3]</sup>;许铁等利用支持向量机方法构建了居民出行方式的选择模型<sup>[4]</sup>;姚荣涵运用量子能级跃迁理论定量描述了出行方式的转移规律<sup>[5]</sup>;刘炳恩等基于非集计离散选择理论构建了北京市居民出行方式选择的 MNL 模型<sup>[6]</sup>。相对而言,学者们对居民出发时间的研究相对不足<sup>[7]</sup>,近年来,随着交通需求管理理念的兴起,弹性工作制、拥挤收费等管理措施的实施,要求交通管理者能够准确把握居民的出发时间规律,因此,居民出发时间的研究逐渐得到重视。Saleh 等构建了苏格兰爱丁堡中心城居民工作出行与非工作出行的出发时间选择模型,模拟了当收取拥挤费用时出行者出发时间的变化情况<sup>[8]</sup>;Ozbay 等建立了基于出行时间价值的出发时刻选择模型,分析了评价美国

新泽西州出台的拥挤收费政策<sup>[9]</sup>;宗芳等依据出行活动需求预测理论,构建了出行时间选择的 Logistic 回归模型<sup>[10]</sup>。

目前,多数研究将出行方式与出发时间分开来考虑,忽略了二者之间的内在联系,事实上,出行方式与出发时间之间存在密切联系,例如,高峰时段人们更倾向于选择公共交通方式,居民出行时常将二者联合起来综合决策,有关出发时间和出行方式的联合选择研究较鲜见。Bhat 采用 MNL 模型分析了基于都市购物者出行方式与出发时间联合选择的问题<sup>[11]</sup>,但 MNL 模型具有不相干方案独立(Independence of Irrelevant Alternatives, IIA)性质,即假设备选方案之间相互独立,因而无法刻画不同出发时间段之间与不同出行方式之间的关联性;De Jong 等将改进的混合 Logit 模型应用于联合出发时间和出行方式的选择方案中<sup>[12]</sup>,尽管混合 Logit 模型允许各备选方案之间存在相关性,但求解需借助计算机模拟技术,并不适合大规模居民出行的预测分析。

广义 Logit 模型是另外一种改进的 Logit 模型,以广义极值(Generalize Extreme Value, GEV)理论为基础<sup>[13-15]</sup>,既能考虑备选方案之间的相关性,且无需借助模拟技术就能推导出封闭形式的选择肢概率表达式,具有较强的优越性。鉴于以上分析,本文以广义分层 Logit(Nested Logit, NL)模型为基础,在日益增长的交通拥堵背景下,通过改变出行效用变量,分析其对出发时间和出行方式的影响程度,为

评价交通规划与管理政策与缓解城市交通拥堵提供理论依据。

## 1 模型构建

在 NL 模型中,存在分层次的巢式结构,允许每个巢内的选择肢之间存在相关性,而不同巢的各选择肢之间保持独立,故能在一定程度上克服 MNL 模型的 IIA 特性<sup>[13]</sup>。同时,NL 模型具有封闭形式的概率表达式,适合大规模的居民出行预测分析。

构建出发时间与出行方式联合选择的 NL 模型,需解决 3 个关键问题:确定模型结构,即如何确定时间选择肢与方式选择肢的位置关系;时间选择肢的表示方法,即如何划分各个时间段;确立效用变量函数。

### 1.1 模型结构

在 NL 模型中,不同类型的选择肢处于不同的层次,即时间选择肢与方式选择肢分别处于模型的 2 个层次。一般而言,对效用变量(如出行费用等)变化敏感性较大的选择肢位于模型的下层,反之位于上层。为检验出发时间与出行方式的相对敏感性,本文构建 2 种不同结构的 NL 模型,分别见图 1、2。在图 1 中,出行方式位于上层,出发时间位于下层,模型结构包含 2 个巢,图 2 则与之相反,包含  $k$  个巢。

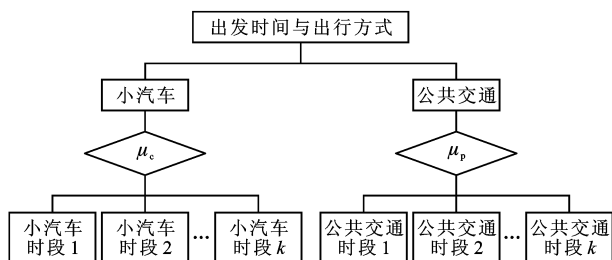


图 1 出发时间位于下层的 NL 模型结构

Fig. 1 NL model structure with departure time located in lower layer

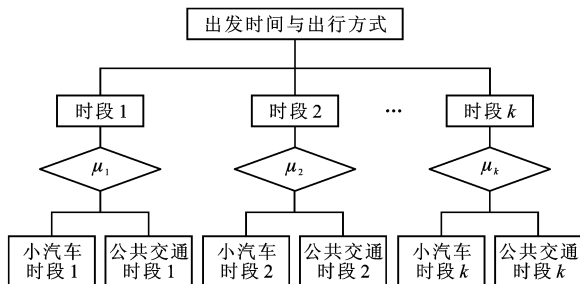


图 2 出行方式位于下层的 NL 模型结构

Fig. 2 NL model structure with travel mode located in lower layer

小汽车和公共交通是当前中国大城市中最主要的 2 种出行方式,因此,模型的出行方式选择子集合

包含 2 个选择肢,即为小汽车和公共交通 2 种出行方式;出发时间子集合包含  $k$  个选择肢,即  $k$  个出行时间段。模型集合为  $C = \{c_i\} (i=1, 2, \dots, I)$ ,共包含  $I=2k$  个备选方案。

$\mu (0 < \mu \leq 1)$  为异质参数,是 NL 模型中的重要参数,反映每个巢内各选择肢的相关程度<sup>[13]</sup>。 $\mu_c$  为小汽车方式在不同出行时间段的相关程度, $\mu_p$  为公共交通方式在不同出行时间段的相关程度; $\mu_c (\mu_p)$  的值越接近 0,相关性越大,越接近 1,相关性越小;当  $\mu_c, \mu_p$  均为 1 时,模型退化为 MNL 模型。 $\mu_k$  为第  $k$  个时间段内不同出行方式之间的相关程度,值越接近 0,相关性越大,越接近 1,相关性越小,当  $\mu_k$  为 1 时,模型退化为 MNL 模型。

### 1.2 时间选择肢的划分方法

出发时间段的划分方式直接影响 NL 模型的参数标定结果。为比较不同划分方法对模型结果的影响,本文选取 2 种划分方法:方法 1 将 1 d 划分为 24 个时段,每个时段为 1 h,编号依次为 1、2、...、24;方法 2 按照高峰与非高峰时段,将 1 d 划分为 5 个时段,分别为早高峰前(0:00~6:59)、早高峰(7:00~9:29)、中间时段(9:30~15:59)、晚高峰(16:00~19:29)、晚高峰后(19:30~24:00)。

### 1.3 效用变量函数与选择概率

根据随机效用最大化理论,出行者  $n$  选择方案  $c_i$  的效用为  $U_{i,n}$ ,则当且仅当  $U_{i,n} > U_{j,n} (j \in I, j \neq i)$ ,出行者  $n$  选择方案  $c_i$ 。

$U_{i,n}$  是一个随机变量,由确定性的系统项  $V_{i,n}$  和随机的效用误差  $\epsilon_{i,n}$  组成。系统项是效用变量(通常包括备选方案属性变量和出行者特征变量)的函数,效用误差用来描述研究者无法观察到的因素对方案效用的影响。由以上分析得

$$U_{i,n} = V_{i,n} + \epsilon_{i,n} \quad (1)$$

考虑到结果分析和系数标定的方便性,通常采用线性函数描述系统项,即

$$V_{i,n} = \sum_{l=1}^L \theta_l X_{i,n,l} \quad (2)$$

式中: $X_{i,n,l}$  为出行者  $n$  选定的第  $i$  个方案中的第  $l$  个变量; $L$  为第  $i$  个方案中的变量个数; $\theta_l$  为第  $l$  个变量的待定系数。

通过分析出行者的选择行为,并考虑数据的可获得性,最终确定出 3 类共  $9+k$  个效用变量,具体见表 1。本文采用极大似然法<sup>[16]</sup>估计效用变量的系数。

假定每个备选方案的效用误差项均服从标准极值分布,则根据备选方案的联合累积分布函数可知,

表 1 效用变量  
Tab. 1 Utility variables

类别	变量名		含义
出行者特征变量	年龄	年龄段 1	哑变量,年龄在 25 岁及以下取 1,否则取 0
		年龄段 2	哑变量,年龄在 26 岁至 55 岁之间取 1,否则取 0
		年龄段 3	哑变量,年龄在 56 岁及以上取 1,否则取 0
	收入	收入段 1	哑变量,月收入低于 5 000 元取 1,否则取 0
		收入段 2	哑变量,月收入在 5 001 元至 10 000 元之间取 1,否则取 0
		收入段 3	哑变量,月收入大于 10 000 元取 1,否则取 0
	是否拥有小汽车		哑变量,是取 1,否则取 0
出行方式服务水平变量	出行总耗时		连续变量,一次出行耗费的时间(min)
	出行总费用		连续变量,小汽车出行的总费用与距离相关的油费表示,公共交通则用票价表示(元)
行程特性变量	出发时间哑变量 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_k$		共 $k$ 个哑变量,分别表示是否在第 $k$ 个时段出发,是取 1,否则取 0

注:在计算出行费用时,小汽车每百公里耗油按 8 L 计。

第  $i$  个备选方案的选择概率  $P(c_i)$  为<sup>[16-21]</sup>

$$P(c_i) = P(m)P(c_i | m) = \frac{\left(\sum_{j \in N_m} e^{V_j/\mu_m}\right)^{\mu_m}}{\sum_m \left(\sum_{j \in N_m} e^{V_j/\mu_m}\right)^{\mu_m}} \cdot \frac{e^{V_i/\mu_m}}{\sum_{j \in N_m} e^{V_j/\mu_m}} \quad (3)$$

式中: $P(m)$ 为选择巢  $m$  的概率; $P(c_i | m)$ 为在选择巢  $m$  条件下选择第  $i$  个备选方案的条件概率; $N_m$  为巢  $m$  中的选择肢集合; $V_i$  为选择第  $i$  个备选方案的系统效用; $\mu_m$  为巢  $m$  的异质参数。

2 计算结果分析

本文以单次出行为分析单元,出行目的包括工作和非工作出行,数据来源于北京市原城八区居民出行的样本调查,共计 2 319 个有效样本。

2.1 参数估计结果

通过 Biogeme 软件平台,本文编制描述模型结构文件、系统参数文件与数据样本文件,并按 2 种时间划分方式(简称为方法 1、2)对上述 NL 模型进行参数估计和检验。为比较 NL 模型与 MNL 模型的区别,本文还同时列出 MNL 模型的参数估计计算结果,分别见表 2、3。

为使模型更易于识别和分析,在表 2 中,因剔除了个别样本数较少的时间段数据,故样本数降至 2 204, $\delta_8$  预设为 0;带“\*”的参数表示该参数显著不等于 0,显著性水平取 0.05。在出行方式位于下层的 NL 模型中,仅列出显著不等于 1.000 的异质参数,显著性水平同样取 0.05。在表 3 中, $\delta_2$  预设为 0。

通过对比表 2、3 中各种模型调整后的拟合优度可以发现,方法 1 略优于方法 2。在 2 种时间划分方式下,NL 模型均优于 MNL 模型,其中出发时间位于下层的 NL 模型对样本数据的拟合程度最高。因为出发时间位于模型下层,意味着相对于出行方式,出发时间对出行效用变量(如出行费用)的改变更为敏感,若出行效用变量改变时,出行者首先考虑变更出发时间,其次才会考虑变更出行方式。

在表 2、3 中,出行总耗时和出行总费用的参数估计值均为负,且显著性较高,符合研究预期。年龄段 2 与收入段 3 的参数值为正,且在 3 个模型中均显著,表明年龄处于 26~55 岁之间与月收入在 10 000 元以上对出行具有正效应,是否拥有小汽车对出行亦具有显著正效应。

在表 2 的出发时间位于下层的 NL 模型中,异质参数  $\mu_c$  为 0.574, $\mu_p$  为 0.803,均小于 1.000,表明同一种出行方式在不同出发时间段内具有较强的相关性(或可替代性),且小汽车的相关性大于公共交通的相关性,说明当效用变量改变时,小汽车出行者更易变更其出发时间。相比之下,在出行方式位于下层的 NL 模型中,异质参数普遍较大,接近于 1.000,表明同一时间段内各出行方式之间的相关性(可替代性)较小。在表 3 中,2 种 NL 模型的异质参数也呈现出类似的规律性。

2.2 预测与模拟分析

收取高峰时段小汽车出行费用,能均衡交通流量时间分布,促使人们选择公共交通方式,是国外已证明行之有效的交通需求管理措施。为检验该措施对北京市居民出发时间和出行方式的影响程度,本文借助于 NL 模型进行预测与模拟分析。

表 2 方法 1 计算结果

Tab. 2 Calculation results of method 1

模型类型	MNL 模型		出发时间位于下层的 NL 模型		出行方式位于下层的 NL 模型	
	参数估计值	$t$ 检验值	参数估计值	$t$ 检验值	参数估计值	$t$ 检验值
出行总耗时/min	-0.049 2 *	-14.211 0	-0.052 3 *	-14.205 0	-0.041 0 *	-13.817 0
出行总费用/元	-0.008 *	-6.220	-0.007 *	-5.873	-0.007 *	-6.104
是否在时间段 6 出发 $\delta_6$	-2.471	-1.300	-2.034	-1.055	-1.982	-1.000
是否在时间段 7 出发 $\delta_7$	-0.823	-0.924	-1.239	-0.940	-0.984	-0.917
是否在时间段 8 出发 $\delta_8$	0.000		0.000		0.000	
是否在时间段 9 出发 $\delta_9$	0.405 *	2.697	0.412 *	2.876	0.468 *	3.332
是否在时间段 10 出发 $\delta_{10}$	-0.029	-0.652	-0.018	-0.535	-0.020	-0.533
是否在时间段 11 出发 $\delta_{11}$	-0.773	-0.900	-0.690	-0.840	-0.708	-0.829
是否在时间段 12 出发 $\delta_{12}$	-2.845	-1.363	-2.952	-1.472	-2.785	-1.443
是否在时间段 13 出发 $\delta_{13}$	-4.077 *	-3.609	-4.031 *	-3.601	-3.372 *	-3.197
是否在时间段 14 出发 $\delta_{14}$	-0.882	-1.026	-0.653	-0.818	-0.794	-0.903
是否在时间段 15 出发 $\delta_{15}$	-1.235	-1.144	-0.998	-1.005	-1.234	-1.188
是否在时间段 16 出发 $\delta_{16}$	0.352 *	2.370	0.309 *	2.354	0.450 *	3.062
是否在时间段 17 出发 $\delta_{17}$	1.030 *	4.257 *	0.992 *	3.874	0.999 *	3.944
是否在时间段 18 出发 $\delta_{18}$	1.266 *	4.842	1.068 *	4.414	1.107 *	4.540
是否在时间段 19 出发 $\delta_{19}$	1.383 *	5.020	1.184 *	4.824	1.202 *	4.903
是否在时间段 20 出发 $\delta_{20}$	0.081 *	2.238	0.076	1.878	0.076	1.822
是否在时间段 21 出发 $\delta_{21}$	-2.054 *	-1.315	-2.001	-1.255	-1.894	-0.909
是否在时间段 22 出发 $\delta_{22}$	-1.796	-1.109	-1.864	-1.301	-1.645	-0.885
是否在时间段 23 出发 $\delta_{23}$	-3.283	-1.635	-3.559	-1.850	-3.093	-1.474
年龄段 2	1.190	1.708	2.353 *	3.116	1.221	1.843
年龄段 3	-0.776	-0.812	-1.084	-0.829	-0.992	-0.918
收入段 1	-0.474	-0.488	-0.333	-0.388	-0.400	-0.524
收入段 3	2.108 *	4.434	2.200 *	4.640	2.240 *	4.652
是否拥有小汽车	8.075 *	7.241	7.924 *	7.019	7.981 *	7.045
异质参数			$\mu_c = 0.574, \mu_p = 0.803$		$\mu_7 = 0.901, \mu_8 = 0.866, \mu_9 = 0.902, \mu_{16} = 0.953, \mu_{17} = 0.891, \mu_{18} = 0.808, \mu_{19} = 0.811, \mu_{20} = 0.916$	
样本数	2 204		2 204		2 204	
调整后的拟合优度	0.341		0.412		0.367	

表 3 方法 2 计算结果

Tab. 3 Calculation results of method 2

模型类型	MNL 模型		出发时间位于下层的 NL 模型		出行方式位于下层的 NL 模型	
	参数估计值	$t$ 检验值	参数估计值	$t$ 检验值	参数估计值	$t$ 检验值
出行总耗时/min	-0.068 0 *	-15.501 0	-0.070 1 *	-16.116 0	-0.088 0 *	-16.826 0
出行总费用/元	-0.010 0 *	-8.216 0	-0.011 8 *	-8.309 0	-0.009 0 *	-7.204 0
是否在早高峰前出发 $\delta_1$	-5.211 *	-7.482	-4.767 *	-7.040	-5.392 *	-7.917
是否在早高峰出发 $\delta_2$	0.000		0.000		0.000	
是否在中间时段出发 $\delta_3$	-3.234 *	-4.065	-3.004 *	-4.025	-4.824 *	-4.591
是否在晚高峰出发 $\delta_4$	0.792	1.728	0.625	1.474	0.927	1.903
是否在晚高峰后出发 $\delta_5$	-0.886	-1.901	-0.763	-1.809	-0.908 *	-2.284
年龄段 2	3.312 *	3.883	2.983 *	3.436	3.438 *	4.042
年龄段 3	-0.945	-1.715	-0.966	-1.725	-1.303	-1.884
收入段 1	-0.385	-0.900	-0.309	-0.759	-0.333	-0.820
收入段 3	2.941 *	4.823	3.022 *	4.920	2.918 *	4.716
是否拥有小汽车	8.108 *	7.009	6.360 *	6.741	8.485 *	7.308
异质参数			$\mu_c = 0.703, \mu_p = 0.800$		$\mu_1 = 0.928, \mu_2 = 0.804, \mu_3 = 0.976, \mu_4 = 0.812, \mu_5 = 0.945$	
样本数	2 319		2 319		2 319	
调整后的拟合优度	0.338		0.404		0.356	

为便于分析,选择方法中拟合优度较高的出发时间位于下层的 NL 模型。根据表 3 计算结果,利用式(3)计算每个出行者的出行选择概率,再借助 Monte Carlo 仿真方法<sup>[22]</sup>集计出每个备选方案的选择概率。当早高峰时段收取的小汽车出行费分别为 5、10、20 元时(分别简称为工况 1、2、3),居民出发时间和出行方式的变化预测结果分别见表 4~6。在表 4~6 中,黑体数字表示当收取早高峰时段小汽车出行费用后,仍坚持原有出发时间和出行方式的居

民所占的比例,其他位置的数字则表示由原有出行方案转向其他方案的居民所占的比例。例如,当早高峰时段小汽车出行费用为 10 元时,采用小汽车出行方式的居民有 51.7%的比例仍坚持原有的出行方案,7.9%的比例改用公共交通出行方式,25.0%和 15.4%的比例仍坚持采用小汽车出行方式,但分别提前和推迟出发。图 3 为收取不同费用时,早高峰时段小汽车使用者出行方式与出发时间的改变情况。

表 4 工况 1 出行方式和出发时间  
Tab. 4 Travel modes and departure times of section 1 %

出发时间	出行方式	实际比例	预测比例	早高峰前		早高峰		中间时段		晚高峰		晚高峰后	
				小汽车	公共交通	小汽车	公共交通	小汽车	公共交通	小汽车	公共交通	小汽车	公共交通
早高峰前	小汽车	7.1	6.5	<b>99.3</b>	0.2	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	公共交通	2.4	1.7	0.0	<b>99.9</b>	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
早高峰	小汽车	14.7	15.5	16.0	0.2	<b>72.6</b>	4.8	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	公共交通	16.6	16.7	0.0	6.7	0.0	<b>89.8</b>	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0
中间时段	小汽车	7.4	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>98.4</b>	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0
	公共交通	9.5	9.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	<b>99.8</b>	0.0	0.0	0.0	0.0
晚高峰	小汽车	21.2	22.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	<b>99.6</b>	0.0	0.3	0.0
	公共交通	12.8	13.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	<b>95.8</b>	0.0	2.8
晚高峰后	小汽车	6.4	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>99.9</b>	0.1
	公共交通	1.9	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>100.0</b>

表 5 工况 2 出行方式和出发时间  
Tab. 5 Travel modes and departure times of section 2 %

出发时间	出行方式	实际比例	预测比例	早高峰前		早高峰		中间时段		晚高峰		晚高峰后	
				小汽车	公共交通	小汽车	公共交通	小汽车	公共交通	小汽车	公共交通	小汽车	公共交通
早高峰前	小汽车	7.1	6.5	<b>96.2</b>	0.6	0.0	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	公共交通	2.4	1.7	0.0	<b>99.9</b>	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
早高峰	小汽车	14.7	15.5	25.0	0.0	<b>51.7</b>	7.9	15.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	公共交通	16.6	16.7	0.0	10.4	0.0	<b>80.6</b>	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0
中间时段	小汽车	7.4	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>98.2</b>	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0
	公共交通	9.5	9.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	<b>99.1</b>	0.0	0.0	0.0	0.0
晚高峰	小汽车	21.2	22.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>99.9</b>	0.0	0.1	0.0
	公共交通	12.8	13.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	<b>96.2</b>	0.0	2.3
晚高峰后	小汽车	6.4	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>99.9</b>	0.1
	公共交通	1.9	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>100.0</b>

从表 4~6、图 3 中可以看出,随着增大收取早高峰时段小汽车出行费用,早高峰时段的交通流被削平,交通流量的时间分布趋于均衡;同时,需要引起交通管理者注意的是,收取早高峰时段小汽车出行费用,对出行方式的影响不明显,也就是说,以现阶段北京市公共交通的服务水平,在早高峰时段额

外收取 3 种额度的小汽车费用,尚不足以吸引大量小汽车出行者转向改用公共交通出行。

3 结 语

把握居民出行方式和出发时间的联合选择规律是制定和评价交通政策(尤其是交通需求管理政策)

表 6 工况 3 出行方式和出发时间

Tab. 6 Travel modes and departure times of section 3

%

出发 时间	出行 方式	实际 比例	预测 比例	早高峰前		早高峰		中间时段		晚高峰		晚高峰后	
				小汽车	公共交通	小汽车	公共交通	小汽车	公共交通	小汽车	公共交通	小汽车	公共交通
早高 峰前	小汽车	7.1	6.5	<b>93.3</b>	2.3	0.0	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	公共交通	2.4	1.7	0.0	<b>99.9</b>	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
早 高峰	小汽车	14.7	15.5	30.2	0.0	<b>27.5</b>	11.9	30.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	公共交通	16.6	16.7	0.0	10.4	0.0	<b>80.6</b>	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0
中间 时段	小汽车	7.4	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>92.7</b>	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0
	公共交通	9.5	9.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	<b>98.8</b>	0.0	0.0	0.0	0.0
晚 高峰	小汽车	21.2	22.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>99.9</b>	0.0	0.1	0.0
	公共交通	12.8	13.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	<b>97.7</b>	0.0	2.0
晚高 峰后	小汽车	6.4	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>100.0</b>	0.0
	公共交通	1.9	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>100.0</b>

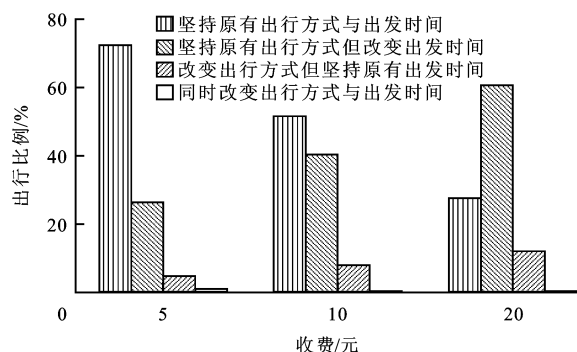


图 3 出行行为对比

Fig. 3 Comparison of travel behaviors

的重要前提,本文通过构建不同结构的分层 Logit 模型,并应用于北京市居民出行方式和出发时间联合选择的出行中,得到以下结论。

(1) 分层 Logit 模型考虑了备选方案间的相关性,能够克服传统 MNL 模型的 IIA 特性,且无需借助计算机模拟技术即可求得选择方案的概率表达式;从对北京市居民出行数据的拟合优度看,分层 Logit 模型具有比 MNL 模型更好的统计学特征。

(2) 2 种时间段划分方式下的模型拟合结果均表明,出发时间位于下层、出行方式位于上层的 NL 模型结构较好,这意味着出发时间之间的替代性大于出行方式之间的替代性,当改变出行效用变量时,出行者首先改变出发时间,其次才会考虑改变出行方式。

(3) 早高峰时段收取小汽车出行费用的居民出行模拟分析表明,随着增大收取费用,交通流量的时间分布趋于均衡,而相比之下,居民交通方式的改变不明显,由小汽车方式转向公共交通方式的居民比例不高。北京市交通管理者应从换乘便捷度、发车

频率、舒适性、准点性等方面不断提高公共交通的服务水平,以此吸引更多居民采用公共交通出行,同时可对小汽车出行方式适当采取强制限制手段。

#### 参 考 文 献 :

#### References :

- [1] PALMA A D, ROCHAT D. Mode choice for trips to work in Geneva: an empirical analysis [J]. Journal of Transport Geography, 2000, 8(1): 43-51.
- [2] BHARAT P, BHATTE O I. Errors in variables in multinomial choice modeling: a simulation study applied to a multinomial logit model of travel mode choice [J]. Transport Policy, 2011, 18(2): 326-335.
- [3] LIMTANAKOOL N, DIJST M, SCHWANEN T. The influence of socioeconomic characteristics, land use and travel time considerations on mode choice for medium and longer-distance trips [J]. Journal of Transport Geography, 2006, 14(5): 327-341.
- [4] 许 铁, 高林杰, 景 鹏, 等. 基于 PSO-SVM 的居民出行方式预测模型 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(5): 155-161.  
XU Tie, GAO Lin-jie, JING Peng, et al. Prediction model of residents' trip mode based on PSO-SVM [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(5): 155-161. (in Chinese)
- [5] 姚荣涵. 基于最大信息熵的居民出行分布模型研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2004.  
YAO Rong-han. Study on inhabitant trip distribution model based on maximum information entropy [D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese)
- [6] 刘炳恩, 雒志才, 李艳玲, 等. 居民出行方式选择非集计模型的建立 [J]. 公路交通科技, 2008, 25(5): 116-120.  
LIU Bing-en, JUAN Zhi-cai, LI Yan-ling, et al. Development of a multinomial logit model for travel mode choice of residents [J]. Journal of Highway and Transportation Research

- and Development, 2008, 25(5): 116-120. (in Chinese)
- [7] LEMP J D, KOCKELMEN K M, DAMIEN P. The continuous cross-nested logit model: formulation and application for departure time choice[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2010, 44(5): 646-661.
- [8] SALEH W, FARRELL S. Implications of congestion charging for departure time choice: work and non-work schedule flexibility[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2005, 39(9): 773-791.
- [9] OZBAY K, YANMAZ-TUZEL O. Valuation of travel time and departure time choice in the presence of time-of-day pricing[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2008, 42(4): 577-590.
- [10] 宗芳, 隽志才, 张慧永. 基于活动的日活动计划模型[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2007, 37(6): 1294-1299.  
ZONG Fang, JUAN Zhi-cai, ZHANG Hui-yong. Activity-based full day activity pattern model[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(6): 1294-1299. (in Chinese)
- [11] BHAT C R. Analysis of travel mode and departure time choice for urban shopping trips[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1998, 32(6): 361-371.
- [12] DE JONG G, DALY A, PIETERS M, et al. A model for time of day and mode choice using error components logit[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2003, 39(3): 245-268.
- [13] WEN C H, KOPPELMAN F S. The generalized nested logit model[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2001, 35(7): 627-671.
- [14] BEKHOR S, PRASHKER J N. GEV-based destination choice models that account for unobserved similarities among alternatives[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2008, 42(3): 243-262.
- [15] PINJARI A R. Generalized extreme value-based error structures for multiple discrete-continuous choice models[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2011, 45(5): 474-489.
- [16] BIERLAIRE M. A theoretical analysis of the cross-nested logit model[J]. Annals of Operation Research, 2006, 144(1): 287-300.
- [17] PAPOLA A. Some developments on the cross-nested logit model[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2004, 38(9): 833-851.
- [18] 胡华, 腾靖, 高云峰, 等. 多模式公交信息服务条件下的出行方式选择行为研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(2): 87-92.  
HU Hua, TENG Jing, GAO Yun-feng, et al. Research on travel mode choice behavior under integrated multi-modal transit information service[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(2): 87-92. (in Chinese)
- [19] 刘浩学, 冯忠祥, 赵炜华, 等. 中国农村人口活动出行距离分布模型[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(6): 68-71.  
LIU Hao-xue, FENG Zhong-xiang, ZHAO Wei-hua, et al. Trip distance distribution mode of Chinese rural population[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(6): 68-71. (in Chinese)
- [20] 曲大义, 于仲臣, 庄劲松, 等. 苏州市居民出行特征分析及交通发展对策研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2001, 31(3): 118-123.  
QU Da-yi, YU Zhong-chen, ZHUANG Jin-song, et al. Analysis on the resident trip characteristics and study on the transport development policies in Suzhou[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2001, 31(3): 118-123. (in Chinese)
- [21] 冯忠祥, 刘浩学, 张景峰. 农村人口出行方式选择模型[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(3): 77-83.  
FENG Zhong-xiang, LIU Hao-xue, ZHANG Jing-feng. Selection model of trip modes for rural population[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(3): 77-83. (in Chinese)
- [22] LAHIRI K, GAO Jian. Bayesian analysis of nested logit model by Markov chain Monte Carlo[J]. Journal of Econometrics, 2002, 111(1): 103-133.