

居民出行链、出行方式与出发时间联合选择的交叉巢式Logit模型

杨励雅^{1,†} 李娟²

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;

† E-mail: liya_yang@263.net

摘要 为刻画出行链、出行方式与出发时间的联合选择行为, 选取出行耗时、出行费用及个人与家庭属性等作为效用变量, 以出行链选择子集合、出行方式选择子集合和出发时间选择子集合的组合作为模型的选择项, 构建基于广义极值(GEV)理论的交叉巢式Logit模型, 为方便对比, 同时构建3种结构的传统NL模型。利用2010年北京市居民工作出行的小样本调查数据, 对模型参数进行估计和检验, 并进行弹性分析, 分析效用变量的改变对备选方案选择概率的影响。参数估计结果表明, 交叉巢式Logit模型具有比NL模型更优的统计学特征, 并发现当效用变量改变时, 选择者最先变更其出发时间, 然后是出行方式, 最后才考虑改变其出行链结构。直接和交叉弹性分析表明, 与简单链的小汽车出行者相比, 复杂链的小汽车出行者对出行时间与出行费用的敏感性较低。研究结果可以为制定和评价交通需求管理政策提供依据。

关键词 出行链; 出行方式; 出发时间; 联合选择; 交叉巢式Logit; 广义极值(GEV)理论

中图分类号 U491

Cross-Nested Logit Model for the Joint Choice of Residential Location, Travel Mode, and Departure Time

YANG Liya^{1,†}, LI Juan²

1. School of Public Administration, Renmin University of China, Beijing 100872; 2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044; † E-mail: liya_yang@263.net

Abstract This paper aims to describe the joint choice of trip chaining, travel mode, and departure time. First, based on random utility maximization theory, the innovative Cross-Nested Logit model and traditional NL model are formulated respectively. Travel time, travel cost, and factors depicting the individual and family socio-economic characteristics are defined as exogenous variables, and the model choice sets are the combination of trip chaining subset, departure time subset, and travel mode choice subset. Second, using Beijing traffic survey data of 2010, the model parameters are estimated, and the direct and cross elasticity are calculated to analyze the change of alternatives probability brought by factors variation. Estimation results show the Cross-Nested Logit model is more accurate statistically than any kind of NL model. Estimation results show that decision makers will change their departure time in the first place, followed by mode choice, and finally, trip chaining type, when exogenous variables alter. Moreover, elasticity analysis results reveal that car travelers of complex trip chaining are less sensitive to travel time and travel cost than car traveler of simple trip chaining.

Key words trip chaining; travel mode; departure time; joint choice; cross-nested logit; GEV

把握居民出行规律是准确预测交通需求的前提。随着活动范围的不断扩大以及时间资源的稀缺性,居民倾向于将一天中的多个出行链接起来,构成出行链^[1-2]。由于出行链包含大量时间、空间、方式及活动类型信息,与传统的基于单次出行的分析相比,基于出行链的分析能更真实地刻画居民出行行为特征^[3]。以出行链为分析单元的活动分析法成为近年来交通、地理等领域的研究热点。

一般地,出行链是指以家为起讫点,包含一个或多个中途活动地点的一系列出行的组合。按照中途活动地点的个数,可将其划分为简单链和复杂链^[4-5]。仅包含一个中途活动地点的出行链(例如家→商场→家)称为简单链,包含一个以上中途活动地点的出行链(例如家→工作单位→商场→家)称为复杂链。

出行链与出行方式、出发时间之间存在深刻的联系。事实上,居民在出行前需要对三者进行权衡与选择。Strathman 等^[3]和 Bhat^[6]的研究表明,复杂链更依赖于灵活性较大的小汽车方式。此外, Ye 等^[4]发现,出发时间在上午 6:00—8:59 之间的出行者,更易选择复杂链,出行链在下午 1:00 前结束的则多为简单链。

将出行链、出行方式与出发时间置于同一个模型中考量,对于揭示三者内在联系,刻画居民出行行为规律具有重要意义。然而,就目前的研究而言,有关出行链、出行方式与出发时间的三维选择问题的研究鲜见,这在一定程度上源于计算模型的限制。

基于随机效用最大化的离散选择模型是出行行为选择领域最常用的分析方法,其中,多项 Logit 模型(Multinomial Logit, MNL)应用最为广泛。例如, Strathman 等^[7]、Albert^[8]和 Wafaa^[9]利用 MNL 模型分别研究了出行链、出行方式与出发时间的离散选择问题。然而, MNL 模型具有 IIA 性质,即假设每个备选方案的效用随机项相互独立且服从 Gumbel 分布,故 MNL 模型无法刻画备选方案之间的关联性,易导致预测的失误^[10]。

随后出现的巢式 Logit 模型(Nested Logit, NL)允许每个“巢”内的备选方案之间具有相关性,而不同“巢”之间的备选方案是相互独立的,故能在一定程度上克服 MNL 模型的 IIA 性质。Hensher 等^[11]利用 NL 模型分析了出行链与出行方式的联合选择行为,发现复杂出行链不利于公共交通的使用。但

是, NL 模型在多维选择问题上仍具有局限性^[12],它仅能考虑备选方案在一个维度上的关联性。例如,对出行链、出行方式与出发时间的联合选择问题,若以出行链建立巢式结构,则模型仅考虑选择相同类型出行链的备选方案之间的关联性。

广义极值模型(Generalized Extra Value, GEV)的出现,是离散选择模型发展进程中的重大突破,其结构灵活多样,可以捕捉任意备选方案之间的关联性,同时它具有封闭形式的概率表达式,无须借助模拟技术就可以估计出来^[12]。GEV 自提出以来,多用于出行方式^[13-14]与出发时间^[15]的选择。

本文利用 GEV 模型理论,构造一种交叉巢式模型结构,并应用于北京市居民出行链、出行方式与出发时间的联合选择中。与其他研究相比,本文的不同点在于: 1) 分析出行链、出行方式与出发时间的联合选择行为,而非出行链或出行方式等的单一或二维选择; 2) 构建基于 GEV 理论的交叉巢式 Logit 模型(Cross Nested Logit, CNL),同时考虑备选方案在出行链、出行方式和出发时间 3 个维度上的关联性,并将之与各种结构的 NL 模型对比。

1 模型构建

GEV 模型允许各备选方案的效用随机项之间存在相关性,根据随机项向量的累积分布函数的不同,可以形成不同形式的 GEV 模型,因此通常被称为“GEV 家族”^[16]。MNL 和 NL 模型是 GEV 模型的基本类型,其他类型的 GEV 模型还包括 Vovsha^[17]和 Bierlaire^[18]所提出的交叉分层 Logit (CNL)模型、Koppelman 等^[19]提出的配对组合 Logit (PCL)模型、Bhat 等^[20]提出的空间交叉 Logit (SCL)模型等。本文在 Bierlaire^[18]和 Hess 等^[21]研究的基础上,构建出行链、出行方式与出发时间联合选择的交叉巢式 Logit 模型(CNL),该模型亦为 GEV 家族的一员。

1.1 模型结构

本文以工作出行链为研究对象。这里,只要包含工作出行的出行链(而不论链中其他部分出行的目的)均视为工作出行链。

首先定义模型的选择项集合,它由 3 个子集合组成:出行链结构集合 tc 、出行方式子集合 md 和出发时间子集合 t 。出行链子集合 tc 包含 2 个选择肢,即复杂链和简单链。出行方式子集合 md 包含 4 个选择肢,分别是步行/自行车、公共交通、小汽

车、组合方式(两种及以上出行方式的组合,但步行与自行车的组合除外)。出发时间子集合 t 包含 3 个选择肢,分别是早高峰(6:00—9:59)、中间时段(10:00—15:59)和晚高峰(16:00—17:59)。模型的最终选择集 $F=f_1, \dots, f_I$ 为 $tc=2, md=4$ 和 $t=3$ 的联合选择集合,共包含 $I=2 \times 4 \times 3=24$ 个备选方案。

为比较 CNL 模型与传统 Logit 模型的异同,以下分别构建出行链、出行方式与出发时间联合选择的 NL 与 CNL 模型。

NL 模型允许每个“巢”内的备选方案之间具有相关性,而不同“巢”之间的备选方案相互独立。一般而言,NL 模型包含两个层次,不同类型的选择肢处于不同的层次。对于出行链、出行方式与出发时间的三维联合选择问题,则有 3 种可能的模型结构。若以出行链进行嵌套,则 NL 模型结构如图 1 所示。

图 1 中的 μ ($0 < \mu \leq 1$) 为异质参数(dissimilarity parameter)^[16],是 NL 模型中的重要参数,反映模型每个“巢”内各选择肢的相关程度。例如, μ_1 反映选择简单链出行时,不同出行方式与出发时间构成的各备选方案之间的相关程度,其值越接近 0,相关性越大;越接近 1,相关性越小;当 $\mu_1 = \mu_2 = 1$ 时,模型退化为 MNL 模型。此外,对于巢式模型(如 NL 模型、CNL 模型), μ 的估计值显著性程度,亦反映

出模型的拟合优度。一般而言, μ 值愈显著,模型的拟合优度愈高。

如前所述, NL 模型仅能考虑备选方案在一个维度上的关联性^①,例如图 1 所示的 NL 模型,只允许选择相同结构出行链的备选方案之间具有关联性。为克服 NL 模型的局限性,本文构建出行链、出行方式、出发时间同时选择的 CNL 模型,如图 2 所示(分配参数 α 未出现在图中,仅列出部分备选方案)。

与 NL 模型不同, CNL 模型中每个备选方案可以隶属于两个以上的“巢”,备选方案对某个巢的隶属度用分配参数 α 表示, α_{im} 为方案 i 对巢 m 的隶属度。对备选方案 i , 有

$$\sum_m \alpha_{im} = 1。$$

1.2 效用函数

根据随机效用最大化理论,对个人 n 而言方案 f_i ($f_i \in F$) 的效用为 U_{in} , 则当且仅当 $U_{in} > U_{jn}$ ($j \in F, \forall j \neq i$), 出行者 n 选择方案 f_i 。

U_{in} 是一个随机变量,由确定性的系统项和随机的效用误差项组成。系统项 V_{in} 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,随机项描述研究者无法观察到的因素对方案效用的影响。

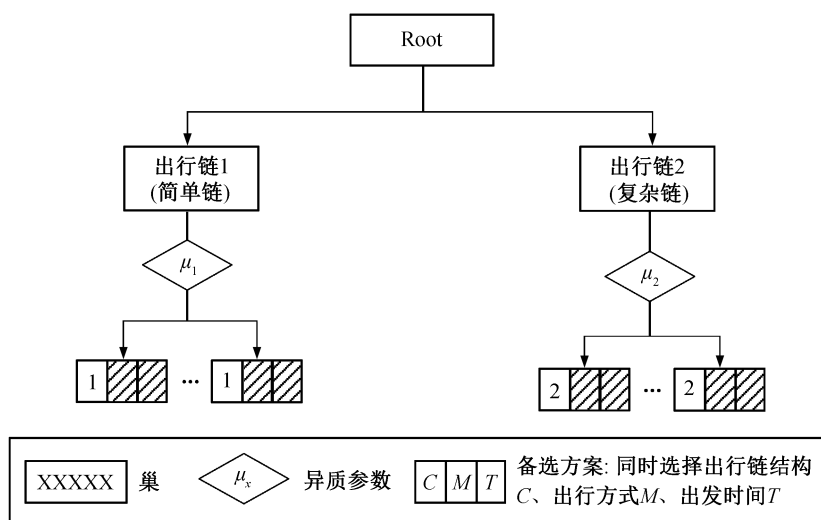


图 1 出行链、出行方式与出发时间同时选择的 NL 模型(以居住地嵌套)

Fig. 1 NL model for joint choice of trip chaining, travel mode, and departure time (nested by residential location)

① NL 模型可以拓展为二层以上的多层次巢式结构,但多层次巢式结构不仅求解较困难,且应用于三维选择问题时,至多只能考虑备选方案在两个维度上的关联性^[21]。

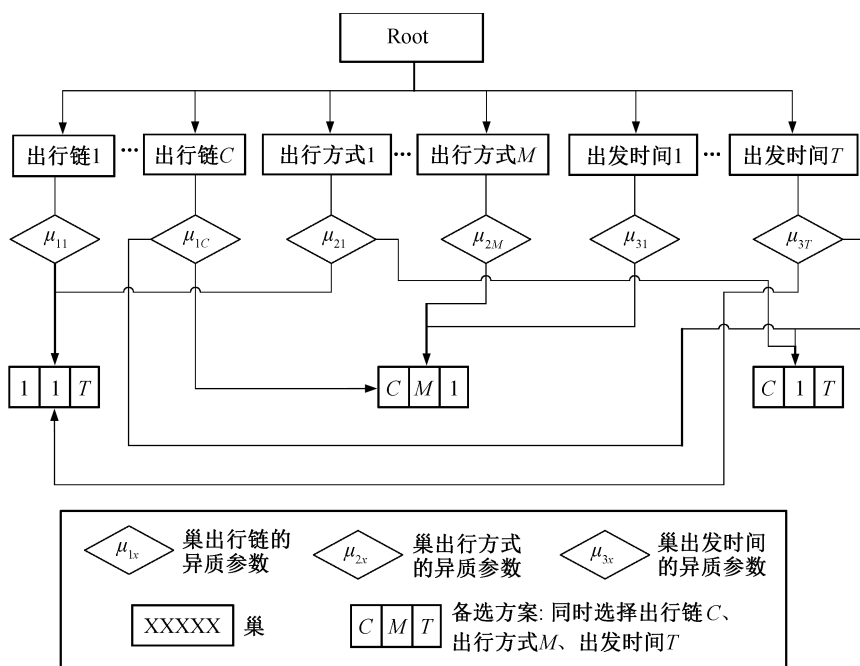


图 2 出行链、出行方式、出发时间同时选择的 CNL 模型

Fig. 2 CNL model for joint choice of trip chaining, travel mode, and departure time

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

效用函数可由一种或多种函数形式表达, 考虑到结果分析和系数标定的方便性, 通常采用线性函数作为效用函数的表达式, 即

$$V_{in} = \sum_{l=1}^L \theta_l X_{inl} \quad (2)$$

式中, X_{inl} 是个人 n 的第 i 个方案的第 l 个变量值, θ_l 是待定系数。为表述方便, 后面所有表示效用及概率的符号下标中均省略代表选择者的“ n ”。

参考 Ye 等^[4]和 Hess 等^[22]的研究, 出行链、出行方式与出发时间同时选择项的系统效用应包括出行特性(如出行时间、费用、距离等)、出行者的个人经济社会属性以及出行者的家庭经济属性。考虑到数据的可获得性, 最终确定 10 个效用变量, 具体说明见表 1。

1.3 选择概率

GEV 模型家族能够获得确定形式的选择概率表达式, 交叉巢式 Logit 模型秉承了这一优越性。假设每个备选方案的效用随机项 ε_i 均服从标准 Gumbel 分布, 则 I 个备选方案的联合累积分布函数为

$$F(\varepsilon_1, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_I)$$

$$= \exp \left\{ - \sum_m \left(\sum_{i \in N_m} (\alpha_{im} e^{-\varepsilon_i})^{1/\mu_m} \right)^{\mu_m} \right\} \quad (3)$$

根据 GEV 模型理论, 可推导出交叉巢式 Logit 模型第 i 个备选方案的选择概率^[16,18]:

$$P_i = \sum_m P_m \cdot P_{i|m} = \sum_m \left(\frac{(\sum_{i \in N_m} (\alpha_{im} e^{V_i})^{1/\mu_m})^{\mu_m}}{\sum_m (\sum_{i \in N_m} (\alpha_{im} e^{V_i})^{1/\mu_m})^{\mu_m}} \cdot \frac{(\alpha_{im} e^{V_i})^{1/\mu_m}}{\sum_{i \in N_m} (e^{V_i})^{1/\mu_m}} \right) \quad (4)$$

式中: α_{im} 为分配参数, 即备选方案 i 对巢 m 的隶属度, $0 \leq \alpha_{im} \leq 1, \forall i, m$, 且 $\sum_m \alpha_{im} = 1, \forall i$; N_m 为巢 m 中的选择肢集合; μ_m 为巢 m 的异质参数, $0 < \mu_m \leq 1$, 其值越接近 0, 表示该巢内各选择肢之间的相关性越大, 越接近 1, 则相关性越小。

式(4)中的未知参数包括分配参数 α 、异质参数 μ 以及效用函数 V_i 中各变量的系数 θ 。

2 模型应用

以下将交叉巢式 Logit 模型应用于北京市居民

表 1 居住地、出行方式、出发时间同时选择模型的变量选取与说明

Table 1 Variable selection and description of model for joint choice of trip chaining, travel mode, and departure time

变量名		说明
出行总时间	TT	连续变量, 一次出行链耗费的时间(min)
出行总费用	TC	连续变量, 一次出行链的总费用, 小汽车出行费用以与距离相关的油费表示, 公共交通则以票价表示
往返行程距离	Dis	出行链各部分距离之和
年龄	Age1	哑变量, 1 为年龄 25 岁及以下
	Age2	哑变量, 1 为年龄在 26~55 之间,
	Age3	哑变量, 1 为年龄在 56 及以上
收入	Income1	哑变量, 1 为月收入低于 5000 RMB
	Income2	哑变量, 1 为月收入在 5001~10000 RMB 之间
	Income3	哑变量, 1 为月收入大于 10000 RMB
是否拥有驾照	License	哑变量, 1 为是, 0 为否
工作时间是否弹性	Time	哑变量, 1 为是, 0 为否
出行者在家活动时间(睡眠除外)	Duin	连续变量, 单位为小时
家中是否有 12 岁以下儿童	Kids	哑变量, 1 为是, 0 为否
家庭拥有车辆数	Car	离散变量, 家庭拥有小汽车台数

注: 计算出行费用时, 小汽车按每百公里耗油 8 L 计, 油价按每升 7.6 RMB 计。

出行链、出行方式与出发时间的同时选择中, 并将之与 NL 模型做对比。

本文数据主要来源于 2009 年 10—11 月间的北京市居民出行链小样本调查^①, 调查区域涵盖东城、海淀、朝阳、通州、昌平、丰台 6 个行政区的 840 户家庭, 调查内容为每户家庭中 18 岁以上成员工作日的某个工作出行链及其相关信息。通过出行空间一致性、出行时间连续性和出行方式一致性检验后, 共得到有效样本 2244 个。

2.1 参数估计

通过 BIOGEME 软件平台^[23], 编制描述模型结构文件(.mod)、系统参数文件(.par)以及数据样本文件(.dat), 对上述交叉巢式 Logit 模型进行参数估计和检验。为比较模型与传统 Logit 模型的区别, 同时列出 NL 模型的参数估计结果, 如表 2 和 3 所示。根据嵌套顺序的不同, 可形成 3 种不同的 NL 模型结构。

由图 2 可知, CNL 模型包含 2+4+3=9 个巢, 2×4×3=24 个备选方案, 因此将产生 9 个异质参数

μ 与 72 个分配参数 α , 因 $\sum_m \alpha_{im} = 1$, 故仍有 48 个分配参数需要估计。巨量的未知参数会降低模型的自由度及其对样本数据的适配性, 参考 Hess 等^[21-22]及 Papola^[24]对分配参数的处理方式, 本文将所有非零分配参数设定为 1/3。

从拟合优度 ρ^2 看, CNL 模型优于任何一种 NL 模型^②, 表明综合考虑备选方案在 3 个维度上的关联性能够提高模型精度; 3 种 NL 模型中, 以出行链类型嵌套的模型结构对样本数据的适应性最强, 适应性最差的是以出行时间嵌套的模型结构。

从效用变量的参数估计值看, CNL 与 NL 的估计结果较为接近。出行总时间、出行总费用的参数估计值为负, 且显著性较高, 符合研究的预期。此外, 拥有驾照、家庭拥有车辆数、家中有 12 岁以下儿童以及月收入在 5001~10000 RMB 对系统效用具有正效应, 而年龄小于 25 岁、工作时间有弹性、在家活动时间则对系统效用具有负效应。

CNL 模型中每个巢的异质参数 μ 小于 NL 模型

① 问卷调查于 2009 年 10 月 15 日开始, 11 月 30 日结束, 调查的居民小区包括东城千福巷社区、交道口社区、铁道科学研究院家属区、二炮清河大院、朝阳城市月光、通州水郡长安、回龙观龙锦苑和丰台怡然家园。

② 本研究在 CNL 模型中对分配参数 α 的取值进行预设, 因此无法对 CNL 模型与各个 NL 模型进行似然比检验, 但仍然可以用调整后的拟合优度来比较模型的精度。

表 2 NL 模型的参数估计结果
Table 2 Parameter estimation results of NL model

变量	以出发时间嵌套		以出行方式嵌套		以出行链嵌套	
	参数值	t-stat	参数值	t-stat	参数值	t-stat
出行总时间 TT	-1.927 ^a	-10.0	-1.461 ^a	-9.8	-1.084 ^a	-9.9
出行总费用 TC	-1.166 ^a	-8.5	-1.030 ^a	-7.9	-0.946 ^a	-7.4
往返行程距离 Dis	0.0000	0.3	-0.0001	-0.4	0.0009 ^a	2.2
Age1	-0.173 ^a	-4.1	-0.105 ^a	-3.1	-0.092 ^a	-3.1
Age3	-0.0032	-0.8	-0.0018	-0.7	-0.0004	-0.2
Income2	0.0688 ^a	2.3	0.0235	1.8	0.0213	1.8
Income3	-0.0001	-1.8	0.0004 ^a	2.3	0.0000	0.9
是否拥有驾照	0.530 ^a	2.9	0.552 ^a	2.9	0.389 ^a	2.4
工作时间是否弹性	-0.238 ^a	-3.2	-0.364 ^a	-3.4	-0.215 ^a	-3.2
出行者在家活动时间(睡眠除外)	-7.701 ^a	-5.8	-7.012 ^a	-5.5	-6.884 ^a	-5.0
家中是否有 12 岁以下儿童	0.683 ^a	3.2	0.716 ^a	4.0	0.717 ^a	4.0
家庭拥有车辆数	2.001 ^a	7.3	2.896 ^a	7.7	2.092 ^a	7.4

异质参数 μ	早高峰		步行/自行车		简单链	
	1.0	—	0.98	0.0		
	中间时段		公共交通		0.66 ^b 2.9	
	0.84	0.6	小汽车			
	晚高峰		组合方式		复杂链	
	0.89	0.2	0.79	1.1	0.58 ^b	3.7

调整 ρ^2	0.319		0.334		0.372	
样本数	2244		2244		2244	

注: a 表示该参数显著不等于 0, 显著性水平取 0.05; b 表示该异质参数显著不等于 1, 显著性水平 0.05。

对应的异质参数, 且显著性提高, 表明 CNL 模型能够更准确地刻画备选方案在各个维度上的关联性。

对比表 3 中出行链、出行方式和出发时间这三类巢的异质参数大小, 可以发现巢“出行链”的异质参数最小, 表明巢内部的各选择肢之间相关性较大, 相互之间有较强的替代性。即当效用变量改变时(如出行时间增加), 选择者一般不会改变其出行链的类型, 而是首先考虑变更出发时间和出行方式。巢“出发时间”的异质参数最大, 且显著性低, 表明巢内部各选择肢之间相关性较小, 难以相互替代, 即当效用变量改变时, 选择者首先考虑变更其出发时间。

2.2 直接和交叉弹性分析

直接弹性被定义为备选方案 i 的第 l 个效用变量值变化 1% 时, 方案 i 选择概率发生的变化; 交叉弹性则指备选方案 i 的第 l 个效用变量值变化 1% 时, 方案 j 选择概率发生的变化。根据 Wen 等^[16]的研究, 可推导出 CNL 模型中第 l 个效用变量的直接弹性与交叉弹性的表达式:

$$DE_l = \frac{\sum_m P_m P_{i|m} [(1 - P_l) + (1/\mu_m - 1)(1 - P_{i|m})]}{P_i} \beta_l X_{il}, \quad (5)$$

$$CE_l = - \left[\frac{\sum_m (1/\mu_m - 1) P_m P_{i|m} P_{j|m}}{P_j} \right] \beta_l X_{il}. \quad (6)$$

表 3 CNL 模型的参数估计结果
Table 3 Parameter estimation results of CNL model

变量	参数值	t-stat
出行总时间 TT	-0.949 ^a	-11.1
出行总费用 TC	-0.825 ^a	-8.1
往返行程距离 Dis	0.0003	0.6
Age1	-0.035 ^a	-3.6
Age3	-0.0002	-0.2
Income2	0.0513 ^a	3.4
Income3	0.0084	1.8
是否拥有驾照	0.582 ^a	4.2
工作时间是否弹性	-1.964	-4.4
出行者在家活动时间(睡眠除外)	-8.205	-7.3
家中是否有 12 岁以下儿童	0.691	5.2
家庭拥有车辆数	1.992	8.0
调整 ρ^2	0.401	
样本数	2244	

早高峰	0.62 ^b	2.2
中间时段	0.73 ^b	1.6
晚高峰	0.59	2.4
步行/自行车	0.34 ^b	3.3
异质参数 μ		
公共交通	0.45 ^b	2.9
小汽车	0.29 ^b	3.9
组合方式	0.57	1.8
简单链	0.16 ^b	9.7
复杂链	0.12 ^b	14.8

注: a 表示该参数显著不等于 0, 显著性水平取 0.05; b 表示该异质参数显著不等于 1, 显著性水平 0.05。

表 4 不同出行链、不同出发时段下出行时间及出行费用对出行方式选择的弹性分析

Table 4 Elastic analysis of travel time and travel cost in different trip chain and different departure time

出行链	出行方式	早高峰				中间时段				晚高峰			
		出行时间弹性		出行费用弹性		出行时间弹性		出行费用弹性		出行时间弹性		出行费用弹性	
		DE	CE	DE	CE	DE	CE	DE	CE	DE	CE	DE	CE
简单链	公共交通	-0.934	0.400	-0.878	0.590	-1.025	0.371	-1.045	0.702	-1.328	0.008	-0.642	0.433
	小汽车	-2.112	0.275	-0.086	0.763	-2.118	0.453	-0.108	0.890	-1.255	0.002	-0.092	0.791
复杂链	公共交通	-0.018	0.000	-0.920	0.002	-0.032	0.001	-0.974	0.009	-0.002	0.170	-0.815	0.001
	小汽车	-0.305	0.005	-0.037	0.000	-0.460	0.014	-0.079	0.001	-0.381	0.255	-0.041	0.008

① MNL 模型的交叉弹性表达式为 $-P_i\beta_jX_{ij}$, 即方案 i 的效用变化对任何方案 j 的影响均相同, 这是由 MNL 模型的 IIA 特性决定的。

② 同理可进行其他效用变量对出行方式的弹性分析, 以及效用变量对出行链或出发时间的弹性分析, 本文略。

可以看出, CNL 模型的交叉弹性受方案 j 选择概率的影响, 即方案 i 的效用变化对不同方案 j 的影响是不同的, 这也说明 CNL 模型考虑了备选方案之间的相关性^①。

本文的弹性分析指不同类型出行链在不同时间段内, 出行时间或出行费用变化引起的出行方式(公共交通、小汽车)选择的变化^②。例如, 当出行链为复杂链时, 在早高峰时段出发, 小汽车出行时间的交叉弹性描述由于公交出行时间变化 1%引起的小汽车方式选择概率的变化, 计算结果见表 4。

由表 4 可知, 简单链的小汽车出行, 其出行时间与出行费用的直接弹性均大于复杂链, 表明与简单链的小汽车出行者相比, 复杂链的小汽车出行者对出行时间与出行费用的敏感性相对较低。公共交通的出行费用弹性普遍大于小汽车方式, 表明与小汽车出行者相比, 公交出行者对出行费用更敏感。此外, 从出发时间段看, 中间时段的时间及费用弹性普遍大于高峰时段。

当出行链为简单链时, 交叉弹性较大; 当出行链为而复杂链时, 交叉弹性较小。这表明, 出行链为简单链时, 一种方式出行时间或费用的增加对其他方式的选择概率影响较大, 而当出行链为复杂链时, 这种影响变得非常小。

3 结论

出行链、出行方式与出发时间共同构成居民出行决策的核心内容。研究三者的联合选择问题, 对刻画居民出行行为规律, 制定与评价交通需求管理政策具有重要意义。传统 Logit 模型(MNL, NL 等)

无法同时刻画备选方案在 3 个维度上的关联性, 易导致预测失误。本文在 GEV 模型理论上, 构造一种交叉巢式 Logit 模型结构, 并用于北京市居民的工作出行分析, 得到以下主要结论。

1) 交叉巢式 Logit 模型继承了 GEV 模型家族的优越特征, 充分考虑了备选方案在多个维度上的关联性, 克服了传统 Logit 模型的 IIA 缺陷; 从模型的拟合结果看, 交叉巢式 Logit 模型具有比任何一种 NL 模型更优的统计学特征, 可作为出行行为研究中有关多维选择问题的分析工具。

2) 异质参数 μ_m ($0 < \mu_m \leq 1$) 描述巢 m 内部各选择肢之间的相关性大小, 其值愈大, 则相关性愈小。对北京市居民工作出行数据的拟合结果显示, 巢“出行链”的 μ 值最小, 其次是巢“出行方式”, 巢“出行时间”的 μ 值最大。这表明, 当效用变量改变时, 选择者首先考虑变更其出发时间, 然后是出行方式, 最后才考虑变更其出行链的结构。以上结果亦反映出北京市工作出行者对出行链、出行方式与出发时间三者选择的先后次序, 即出行者一般先根据个人及家庭的需要将一日的活动和出行组织成出行链, 然后在出行链的约束下考虑选择何种交通方式, 最后在出行链和交通方式的双重约束下决定出发时间。这一结论能够为北京市实施有效交通需求管理政策提供依据。

3) 直接与交叉弹性分析表明, 与简单链的小汽车出行者相比, 复杂链的小汽车出行者对出行时间与出行费用的敏感性较低。当出行链为简单链时, 一种方式出行时间或费用的增加对其他方式的选择概率影响较大, 而当出行链为复杂链时, 这种影响变得非常小。这反映出复杂链出行者对原有出行方式(小汽车方式)的依赖, 这可能源于复杂链涉及多个中途活动地点, 所需的额外停驻以及公共交通相对低下的效率, 使得复杂链出行者更倾向小汽车方式。为提高公共交通承担率, 公共交通的规划应从复杂出行链的特征出发, 从运行模式、发车频率、舒适性、换乘便捷度等方面不断改善服务水平, 提升公共交通对出行者的吸引力。例如, 由于复杂链具有多个停驻点, 可以考虑规划分层级的公共交通, 开行小型公交车, 服务于若干停靠点, 弥补常规公交的不足, 满足复杂链出行者的需求。还可针对复杂链的特点, 提出相应的交通需求管理措施, 如进一步提高中心城办公区停车收费价格等, 降低出行者对小汽车的依赖。

参考文献

- [1] Shiftan Y. Practical approach to model trip chaining. *Transportation Research Record* 1645. Journal of Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, 1998, 1645(1): 17-23
- [2] Dissanayake D, Morikawa T. Household travel behavior in developing countries: nested logit model of vehicle ownership, mode choice, and trip chaining. *Transportation Research Record* 1645. Journal of Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, 2002, 1805(1): 45-52
- [3] Strathman J G, Dueker K J. Understanding trip chaining. Special reports on trip and vehicle attributes [R]. 1990 NPTS Reports Series. Publication No. FHWA-PL-95-033. US Department of Transportation, 1995: 1-1-1-27
- [4] Ye X, Pendyala R M, Gottardi G. An exploration of the relationship between mode choice and complexity of trip chaining patterns. *Transportation Research Part B*, 2007, 41: 96-113
- [5] 杨敏, 陈学武, 王伟, 等. 通勤出行简单链和复杂链的选择行为研究. *武汉理工大学学报: 交通科学与工程版*, 2008, 32(2): 191-194
- [6] Bhat C R. Worker travel mode choice and number of non-work commute stops. *Transportation Research Part B*, 1997, 31(1): 41-54
- [7] Strathman J G, Dueker K J. Effect of household structure and selected characteristics on trip chaining. *Transportation*, 1994, 21: 23-45
- [8] Albert A. Mode choice for the journey to work among formal sector employees in Accra, Ghana. *Journal of Transport Geography*, 1993, 1(4): 219-229
- [9] Wafaa S. Implications of congestion charging for departure time choice: work and non-work schedule flexibility. *Transportation Research Part A*, 2005, 39: 773-791
- [10] Koppelman F S, Sethi V. Closed-form discrete choice models // Hensher D A, Button K J. *Handbook of transport Modeling*, 2nd ed. Amsterdam: Elsevier Science, 2008: 211-225
- [11] Hensher D A, Reyes A J. Trip chaining as a barrier to

- the propensity to use public transport. *Transportation*, 2000, 27(4): 341–361
- [12] Bekhor S, Prashker J N. GEV-based destination choice models that account for unobserved similarities among alternatives. *Transportation Research Part B*, 2008, 42(3): 243–262
- [13] Kenneth A. Small. Approximate generalized extreme value models of discrete choice. *Journal of Econometrics*, 1994, 62(2): 351–382
- [14] Swait J. Choice set generation within the generalized extreme value family of discrete choice models. *Transportation Research Part B*, 2001, 35(7): 643–666
- [15] Bhat C R. Analysis of travel mode and departure time choice for urban shopping trips. *Transportation Research Part B*, 1998, 32(6): 361–371
- [16] Wen C H, Koppelman F S. The generalized nested logit model. *Transportation Research Part B*, 2001, 35: 627–641
- [17] Vovsha P. The cross-nested logit model: application to mode choice in the Tel-Aviv metropolitan area. *Transportation Research Record*, 1997, 1607: 6–15
- [18] Bierlaire M. A theoretical analysis of the cross-nested logit model. *Ann Operation Research*, 2006, 144: 287–300
- [19] Koppelman F S, Wen C H. The paired combinatorial logit model: properties, estimation and application. *Transportation Research Part B*, 2000, 34(2): 75–89
- [20] Bhat C R, Guo J Y. A mixed spatially correlated logit model: formulation and application to residential choice modeling. *Transportation Research Part B*, 2004, 38(2): 147–168
- [21] Hess S, Polak J W. Exploring the potential for cross-nesting structures in airport-choice analysis: a case-study of the Greater London area. *Transportation Research Part E*, 2006, 42: 63–81
- [22] Hess S, Daly A, Rohr C, et al. On the development of time period and mode choice models for use in large scale modeling forecasting systems. *Transportation Research Part A*, 2007, 41: 802–826
- [23] Bierlaire M. BIOGEME: a free package for the estimation of discrete choice models // The Third Swiss Transportation Research Conference. Ascona, 2003: 1–24
- [24] Papola A. Some developments on the cross-nested logit model. *Transportation Research Part B*, 2004, 38: 833–851