【交通物流 / Transportation Logistics】

基于随机后悔广义巢式 logit 的出行效益评估方法

李梦洁¹, 陈富坚¹, 林钦泽²

1) 桂林电子科技大学建筑与交通工程学院, 广西桂林 541004; 2) 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300400

摘要: 目前制定交通政策考虑的因素不尽完善, 导致政策实际效果与预期有差距. 为更好评估交通政策变化对消费者福利(出行者选择效益)的影响, 更有效捕捉出行方案之间的相似特点, 基于后悔理论, 联合出发时间、出行方式和路线3个维度构建随机后悔广义巢式 logit 模型. 结合案例验证, 在该模型结构下, 使用 Logsum 消费者剩余度量方法评估政策变化对出行者效益的影响. 结果表明, 当一个巢的价格属性或非价格属性变化时, 该巢内部对应方案的消费者剩余都会呈不同程度的反比例变化, 该方法能较好地捕捉方案之间的相似性. 研究结果可为相关部门制定和评价交通政策提供依据.

关键词: 交通运输经济; 出行选择; 消费者剩余; 后悔理论; 广义巢式 logit 模型; Logsum 方法
中图分类号: F502; F572 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2021.02128

A travel benefits evaluation method based on random regret generalized nested logit model

LI Mengjie¹, CHEN Fujian¹, and LIN Qinze²

1) School of Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi Zhuang Autonomous Region, P. R. China
2) School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300400, P. R. China

Abstract: At present, the factors considered in formulating the transportation policy are not complete, which leads to the gap between the actual effect and expectation. In order to better evaluate the impact of transportation policy changes on consumer welfare (i. e. traveler's choice benefit), and to more effectively capture the similar characteristics among travel schemes, we develop a generalized nested logit model of random regret based on regret theory which is constructed by combining three aspects of data: the departure time, travel mode and route. In case study, the selection probability is interpreted as an approximate probability demand curve, and the Logsum consumer surplus measurement method is used to evaluate the impact of changes between two policies on traveler benefits under this model structure. The result shows that when the price attribute or the non-price attribute of a nest changes, the consumer surplus of the corresponding alternatives within the nest changes in varying degrees in inverse proportion, thus it better captures the similarity between the schemes. The research results provide reference for relevant departments to formulate and evaluate transportation policies.

Key words: transportation economy; travel choice; consumer's surplus; regret theory; generalized nested logit model; Logsum method

Received: 2020-06-18; **Accepted:** 2020-11-18

Foundation: National Natural Science Foundation of China (61803113); Innovation Project of Guilin University of Electronic Technology Graduate Education (2020YCX122)

Corresponding author: Professor CHEN Fujian. E-mail: 690273745@qq.com

Citation: LI Mengjie, CHEN Fujian, LIN Qinze. A travel benefits evaluation method based on random regret generalized nested logit model [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(2): 128-135. (in Chinese)

<http://journal.szu.edu.cn>

目前交通政策、收费及管理措施的制定标准和依据,并未从人的有限理性决策行为角度分析政策能为社会带来的福利大小,导致政策的实际效果与预期存在差距.政策实施会对决策者行为产生影响,决策者行为变化会直接影响自身效益和社会福利的变化,因此,需要更精确地刻画决策者的行为,并评估决策者效益与政策经济效益.由于消费者剩余能够度量和分析社会福利,衡量由特定政策造成的消费者剩余的变化成为政策福利分析领域的研究热点^[1].微观经济学中的消费者剩余(consumer's surplus)指消费者在购买商品时,愿意付出的代价与其实际付出代价的差额.因此,消费者剩余变化在交通系统可解释为,在出行时间和出行成本等属性变量发生变化时,将出行者在该选择情况下所获得的总效用转换成货币后的变化量^[2].MCCONNELL^[3]为离散选择模型提出著名的消费者剩余货币度量方法,即 Logsum 方法.DEKKER 等^[4]首次提出随机后悔最小化(random regret minimization, RRM)模型的消费者剩余度量方法.STANDEN 等^[5]以悉尼新建的分离式自行车道为例,探讨使用 Logsum 消费者剩余衡量方法评估新型主动式交通基础设施的用户利益.消费者的行为改变直接影响其福利变化,如何刻画出行者的出行行为对福利评估尤为重要.

常见的出行行为选择分析方法是基于随机效用最大化(random utility maximization, RUM)的多项 logit(multinomial logit, MNL)模型.MNL 模型具有无关因素独立性(independence of irrelevant alternatives, IIA)性质,无法刻画备选方案之间的关联性,存在不合理的计算结果^[6].WEN 等^[7]假设效用函数的概率项服从广义极值的联合分布,提出广义极值(generalized extra value, GEV)模型,通过概率项捕获选择方案之间的相关程度.GEV 应用于出行行为和出行方式选择等多个领域后,衍生出巢式 logit(nested logit, NL)^[8]、交叉巢式 logit(cross nested logit, CNL)^[9]及广义巢式 logit(generalized nested logit, GNL)等多种模型^[10].

经典的选择模型(如 logit 和 NL 模型)基于个人是理性的假设,然而心理学和行为经济学领域的各种实验,验证了人并非遵循理性原则.CHROUS 等^[11-12]将非理性因素造成的折中效应纳入离散选择模型间接效用函数的确定项中,提出随机后悔最小化多项 logit 选择模型,可应用于解释和预测交通领域的各种选择.李梦洁等^[13]采用随机后悔理论研究出

行者的路线选择行为,构建多项式 logit 形式的随机均衡模型,验证了后悔厌恶水平可以影响出行者选择行为.

为了更有效地描述出行者的决策行为特点和心理偏好,克服 RRM-MNL 模型的 IIA 特性,捕捉方案之间的相关性,本研究基于后悔理论,联合出发时间、出行方式和路线 3 个维度构建随机后悔广义巢式 logit 模型,在此结构下使用消费者剩余度量方法 Logsum,将选择概率解释为近似概率需求曲线,评估政策变化后的出行者效益的变化,根据福利标准为出行者分配特定的选择.

1 随机后悔广义巢式 logit 模型的构建

后悔理论(regret theory, RT)认为决策者是有限理性且追求预期后悔最小化的^[11].在出行行为研究中,出行者决策时所选方案获得的结果不仅取决于选择方案的效用,还取决于与备选方案的效用比较,若选择其他方案的效用更高,则会感到后悔.后悔理论更关注出行者决策时的心理感知,根据其行为特点和心理偏好能更好刻画出行行为.本研究考虑出行者在 GNL 模型出行选择结构下的后悔心理,捕捉出行者的半补偿行为特点,并比较出行者对巢内部备选方案之间的后悔值.

1.1 GNL 模型结构

为了使研究更具有普遍性,并捕捉方案间的相似性,采用一个双层巢式 GNL 模型描述出行选择行为,以通勤为出行目的,建立 GNL 模型的出行选择树状结构,如图 1.模型的选择包括出发时间、出行方式及路线 3 个集合,出发时间选择肢包括早高峰(07:00—09:00)和晚高峰(17:30—19:30);出行方式选择肢包括公共交通和小汽车,假设公共交通拥挤程度基本一致,即乘坐公共交通路线舒适度一样;路线选择肢集合包括路线 1、路线 2 和路线 3.设定路线时考虑小汽车和公共交通路线的不一致性,出行方式选择肢中公共交通和小汽车路线根据自身属性差异来设置.不同交通方式下的出行路线不一定相同,但各路线均满足以下条件:路线 1 出行时间最短,价格最高;路线 3 出行时间最长,价格最低;路线 2 出行时间和价格介于两者之间.巢数 $m = 7$,因此,产生 7 个巢系数($\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_7$)、36 个分配参数和 12 个备选方案,方案组合如表 1.

图 1 GNL 模型的出行选择结构

Fig. 1 The travel choice structure of GNL model

表 1 出行选择方案组合

Table 1 A combination of travel options

选择方案	出发时间	出行方式	路线
1	早高峰 1	小汽车 1	路线 1
2	早高峰 1	小汽车 1	路线 2
3	早高峰 1	小汽车 1	路线 3
4	早高峰 1	公共交通 2	路线 1
5	早高峰 1	公共交通 2	路线 2
6	早高峰 1	公共交通 2	路线 3
7	晚高峰 2	小汽车 1	路线 1
8	晚高峰 2	小汽车 1	路线 2
9	晚高峰 2	小汽车 1	路线 3
10	晚高峰 2	公共交通 2	路线 1
11	晚高峰 2	公共交通 2	路线 2
12	晚高峰 2	公共交通 2	路线 3

1.2 随机后悔 GNL 模型的后悔函数和选择概率

基于后悔理论, GUEVARA 等^[14]提出的 RRM 模型能够解释选择方案对选择结果的影响, 并发现每个属性值都为中等的选择方案(折中效应的方案)具有更高的市场份额, RRM 模型优于经典 logit 的所有诱饵类型. DEKKER 等^[4]提出 RRM 模型的消费者剩余近似值, 如式(1); i 方案后悔值 R_i 对价格 p_i 求偏导, 如式(2).

$$RR_i = R_i + \varepsilon_i =$$

$$\sum_{j \neq i}^J \left\{ \sum_{n=1}^{M-1} \ln \{ 1 + \exp[\beta_n(x_{jn} - x_{in})] \} + \ln \{ 1 + \exp[\beta_M(p_j - p_i)] \} \right\} + \varepsilon_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial R_i}{\partial p_i} = -\beta_M \sum_{j \neq i} \frac{\exp[\beta_M((p_j - p_i))]}{1 + \exp[\beta_M((p_j - p_i))]} > 0, \\ \forall \beta_M < 0 \quad (2)$$

其中, RR_i 为在选择 i 方案观测到的后悔值; R_i 为选择方案 i 的系统后悔值; β_n 和 β_M 分别为非价格属性和价格属性的相关偏好系数; x_{in} 和 x_{jn} 分别为所选方案 i 和其他备选 j 方案第 n 个属性的属性值; p_i 和 p_j 分别为所选方案 i 和其他备选方案 j 的价格属性值; ε_i 为感知随机误差项, 服从 GEV 分布.

后悔函数对于价格属性在偏好系数小于 0 的情况下是递增函数, 价格越高, 选择该方案的后悔值越大. 在 RRM 模型中, 备选方案的不同属性所导致的决策后悔程度不同, 因此, 模型能够很好捕捉到决策者决策时的半补偿行为. 模型选择概率的变化不仅由备选方案 i 的后悔值增加(减少)引起, 也由所有其他备选方案 $j(j \neq i)$ 的后悔值同时减少(增加)引起.

GNL 模型的选择方案能同时属于多个巢, 将 GNL 选择结构结合 RRM 模型, 构建随机后悔 GNL 模型, 捕捉方案之间的相似性特点. 选择项服从 GEV 分布, 随机后悔 GNL 模型第 i 个备选方案的选择概率 π_i 为^[7]

$$\pi_i = \frac{\sum_m \left\{ (\alpha_{im} e^{-R_i})^{\frac{1}{\mu_m}} \left[\sum_{i' \in N_m} (\alpha_{i'm} e^{-R_{i'}})^{\frac{1}{\mu_m}} \right]^{\mu_m - 1} \right\}}{\sum_m \left[\sum_{i' \in N_m} (\alpha_{i'm} e^{-R_{i'}})^{\frac{1}{\mu_m}} \right]^{\mu_m}} = \sum_m \left\{ \frac{(\alpha_{im} e^{-R_i})^{\frac{1}{\mu_m}}}{\sum_{i' \in N_m} (\alpha_{i'm} e^{-R_{i'}})^{\frac{1}{\mu_m}}} \cdot \frac{\left[\sum_{i' \in N_m} (\alpha_{i'm} e^{-R_{i'}})^{\frac{1}{\mu_m}} \right]^{\mu_m}}{\sum_m \left[\sum_{i' \in N_m} (\alpha_{i'm} e^{-R_{i'}})^{\frac{1}{\mu_m}} \right]^{\mu_m}} \right\} \quad (3)$$

其中, N_m 为巢 m 内所有备选方案的集合; $i'(i' \in N_m)$ 为包含方案 i 在内的任意一种备选方案; R_i 和 $R_{i'}$ 分别为选择方案 i 和 i' 的系统后悔值; α_{im} 与 $\alpha_{i'm}$ 为分配参数, 表示备选方案 i 与 i' 属于巢 m 的程度 ($\alpha_{i'm} \geq 0$, 且 $\sum_m \alpha_{i'm} = 1$); μ_m 为巢系数, 表示巢之间的相关程度 ($0 < \mu_m \leq 1$), μ_m 越接近 1, 巢构成的备选方案之间的相关性越小, μ_m 值越接近 0, 相关性越大。

2 基于随机后悔 GNL 模型的出行效益评估方法

随机后悔 GNL 模型不是一个有效的间接效用函数, 缺乏通用的货币指标来将后悔的变化转化为货币福利措施。但该模型的显著特点在于价格 p_i 的变化可能对 i 方案 R_i 的影响较小, 但对 j 方案 R_j 的变化可能较大, 因此, p_i 仍然受到影响, 可通过研究观察到的行为 (即选择概率) 对价格 (变化) 的反应, 衡量消费者剩余的变化^[4]。

2.1 价格变化的 Logsum 消费者剩余衡量方法

随机后悔 GNL 模型的消费者剩余定义与微观经济学中的并非一致, 在离散选择环境下, 选择概率是消费者对价格和数量变化的最佳反应和最合理近似, 选择概率可以被解释为概率需求曲线, 如图 2。概率函数曲线与坐标轴和概率 $\pi_{p_i}^1$ 围起来的面积为消费者愿意支付的价格总额, 每一个价格对应一个需求, 这个区域表示不同价格时支付货币的累加。实际上消费者仅支付了矩形 $Op_i^1 B \pi_{p_i}^1$ 区域的货币总额, 矩形右边的概率需求曲线与价格 p_i^1 围成的区域 ① 面积即为政策变化 (涨价) 后的消费者剩余

图 2 单一属性的消费者剩余变化
Fig. 2 Consumer surplus change with single attribute change

$CS_{p_i^1}$, 区域 ② 面积与区域 ① 面积之和是原价格的消费者剩余 $CS_{p_i^0}$ 。区域 ② 面积表示采取特定政策之后 (价格变化), 消费者剩余的变化量 ΔCS_{p_i} , 即

$$\Delta CS_{p_i} = \int_{p_i^0}^{p_i^1} \pi_i(p_i) dp_i \quad (4)$$

其中, ΔCS_{p_i} 为消费者剩余变化; p_i^0 和 p_i^1 分别为选择 i 方案的原价格和政策变化 (涨价) 后的价格; π_i 和 $\pi_i(p_i)$ 分别为选择 i 方案的概率和概率需求函数。由图 2 可知, 随着价格上升, 消费者剩余减小, 选择概率提供了关于价格变化时行为变化的最佳信息。

2.2 非价格属性变化的 Logsum 消费者剩余衡量方法

福利标准的改变可以通过分配给特定选择的消费者剩余来衡量。通过将关注行为的变化 (即选择概率变化) 近似为福利标准, 概率选择暗示一定的选择价值, 将这些价值收集起来用以衡量福利的标准, 将总价格 P 分成 N 段, p_{it} 表示第 t 阶段选择 i 的价格, 累加所有选择方案 i 的正值价格增量 Δp_{it} 与选择概率的乘积表示从个人处收集的货币量 (消费者剩余), 计算方法类似于消费者剩余^[2], C_i 为个体选择方案 i 总的消费者剩余,

$$C_i = \sum_{t=1}^N \pi_i(p_{it}) \Delta p_{it} \quad (5)$$

当最后的价格 p_N 使得选择概率下降至 0 时, 个体选择方案的总消费者剩余可近似为

$$C_i = \int_0^\infty \pi_i(p_i) dp_i \quad (6)$$

当选择方案 i 的非价格属性变化时, 选择概率也会改变, 对应的概率需求曲线也会发生变化。因此, 消费者剩余的变化不同于图 2 简单的通过整合价格的变化。图 3 是价格为 0 时两种非价格属性情

图 3 价格为 0 时两种非价格属性情况下的消费者剩余变化
Fig. 3 Change of consumer surplus under two non-price attributes when the price is 0

况下的消费者剩余变化. 可见, 概率需求函数曲线与坐标轴围成的区域面积为消费者剩余 C_i , 阴影部分表示非价格属性变化(如出行时间减小)时, 新情况和原来情况的消费者剩余变化量, 即

$$\Delta C_i = \int_p^\infty \pi_i^1(p_i) dp_i - \int_p^\infty \pi_i^0(p_i) dp_i \quad (7)$$

其中, ΔC_i 分别消费者剩余变化量; π_i^1 和 π_i^0 分别为选择方案 i 的政策变化后的概率和原始情况概率.

3 案例分析

本研究将随机后悔 GNL 模型应用到居民出行选择中, 数据主要来源于 2019 年 10 月中国桂林市七星区的居民出行选择调查, 剔除不规范和异常值问卷得到样本 386 份, 该样本量满足 95% 置信水平下 5% 的误差. 假定路线交通拥挤程度基本一致, 公共交通拥挤度一致, 表 2 是以早高峰为例的出行者选择方案场景. 调查内容主要为以通勤为出行目的的每个被调查者的个人属性(年龄、月收入及是否拥有驾照)和同时选择在不同出发时间、出行方式和路线下的出行链方案, 变量说明见表 3.

表 2 以早高峰为例的出行者选择方案场景

Table 2 Scenario description of traveler's choice scheme taking morning rush hour as an example

交通方式	路线 1	路线 2	路线 3
平均出行时间/min	40	45	50
小汽车			
出行成本/元	15	12	10
您选择的方案 ☒	☐	☐	☐
平均出行时间/min	60	75	90
公共交通			
出行成本/元	8	6	2
您选择的方案 ☒	☐	☐	☐

表 3 模型的变量

Table 3 The variables of model

变量名	说 明
出行总时间	连续变量
出行总成本 ¹⁾	连续变量
年龄	哑变量 (1: 24 岁以下; 2: 24 ~ 38 岁; 3: 39 ~ 49 岁; 4: 50 ~ 60 岁)
月收入	哑变量 (1 表示 5 000 元以下; 2 表示 5 001 ~ 15 000 元; 3 表示 15 000 元以上)
是否拥有驾照	哑变量 (若是取 1, 否则取 0)

¹⁾ 计算出行成本的时, 小汽车按照每百公里耗油 8 L, 6 元 1 L 计

3.1 参数估计

随机后悔 GNL 模型中的未知参数包括后悔函数中的 5 个属性变量的偏好系数、24 个分配参数 (12 个方案 $\times$ 3 个巢 = 36 个分配参数, 但 $\sum_m \alpha_{im} = 1$, 因此, 需要估计 24 个分配参数) 和 7 个巢系数 μ_m . 由于分配参数个数过多, 自由度降低, 因此, 将模型所有非零的分配参数设置为 $1/3$ ^[9].

传统基于 MNL 模型的消费者剩余度量方法, 没有考虑个人是有限理性的, 无法准确度量个人福利和社会福利^[3]. 本研究将后悔理论引用到消费者剩余度量中, 将 RRM-MNL 与 RRM-GNL 模型的拟合优度以及显著性进行比较分析. 参数估计方法为 PythonBiogeme^[15-16] 的 GNL 模型最大似然估计, 采用 2 个模型评估准则对随机后悔 GNL 模型进行参数估计和检验, 分别为赤池信息量准则 (Akaike information criterion, AIC) 和贝叶斯信息准则 (Bayesian information criterion, BIC). 效用变量和参数估计结果见表 4.

表 4 随机后悔 GNL 模型的参数估计结果

Table 4 The parameter estimation results of the random regret GNL model

参 数	RRM-MNL		RRM-GNL	
	参数估计	t 值	参数估计	t 值
出行总时间	-0.073 ¹⁾	-5.78	-0.075 ¹⁾	-8.26
出行总成本	-0.034 ¹⁾	-4.31	-0.030 ¹⁾	-4.67
年龄 2	-0.012 ¹⁾	-13.10	-0.011 ¹⁾	-15.10
年龄 3	-0.013 ¹⁾	-12.50	-0.012 ¹⁾	-14.20
年龄 4	-0.012 ¹⁾	-12.20	-0.011 ¹⁾	-13.90
月收入 1	0.002	1.56	0.001	1.46
月收入 3	0.001	1.40	0.001	1.26
是否拥有驾照	0.158 ¹⁾	2.42	0.126 ¹⁾	1.98
μ_1 早高峰 1			1.000 ²⁾	5.92
μ_2 晚高峰 2			0.590 ²⁾	6.54
μ_3 小汽车 1			0.215 ²⁾	2.82
μ_4 公共交通 2			1.000 ²⁾	9.80
μ_5 路线 1			1.000 ²⁾	8.45
μ_6 路线 2			1.000 ²⁾	5.56
μ_7 路线 3			0.395 ²⁾	2.19
样本量	386		386	
Rho-square	0.25		0.26	
AIC	1 977.42		1 941.38	
BIC	2 009.07		2 005.72	

¹⁾ 为参数显著性不等于 0, 显著水平 0.05;

²⁾ 为巢系数显著不等于 1, 显著水平 0.05.

RRM-MNL 与 RRM-GNL 模型的个人属性包括年龄对模型具有负效应, 月收入以及是否有驾照对模型具有正效应, 其中年龄与是否有驾照的估计值显著性较高, 预期效果较好. 出行总时间和出行总成本的参数估计值对模型具有负效应, 显著性高. 由表 4 可知, Rho-square 值较小, 表示可能还有其他变量共同影响效用, RRM-GNL 模型的拟合和预测效果比 RRM-MNL 模型更好, 能够更有效评估出行者的效益.

由表 4 的巢系数估计结果可见, 巢系数 μ_1 、 μ_2 、 μ_4 、 μ_5 及 μ_6 值近似为 1, 表明这些巢内部各自所构成的备选方案之间相关性很小, 且难以相互替代. 如早高峰乘坐公共交通路线 2 的出行者, 不会轻易妥协选择公共交通路线 3, 当后悔函数的属性变量改变 (如出行时间增加) 时, 出行者会优先考虑改变公共交通的选择. 巢系数 μ_3 和 μ_7 值较小, 表明巢“小汽车”和“路线 3”的内部备选方案之间的相

关性较大, 内部方案可以相互替代. 路线 3 特征是在任意一种出行方式下出行时间最长, 价格最低的方案, 在该巢内组成的选择方案中, 出行者只要选择该特征下的路线 3, 无论什么出行方式和出发时间都可以接受.

3.2 价格变化的 Logsum 评估结果分析

为贯彻落实公共交通优先发展政策, 假设特定政策是实行所有公共交通票价 6 折优惠, 鼓励居民绿色出行. 研究价格下降后造成的消费者剩余变化, 即分析巢“公共交通”价格变化时, 出行者的消费剩余变化与出行行为之间的关联性, 判断政策制定的合理性. 由表 1 可知, 与巢“公共交通”相关的方案有方案 4、5、6、10、11 及 12, 综合上述分析, 根据式 (1)、(3) 和 (4) 改进 Python Biogeme 的 gnl_simul.py 文件, 计算原始情况 6 个方案的选择概率 $\pi_i^0(p_i)$, 并对求得的概率需求函数积分, 结果如表 5.

表 5 公共交通价格属性变化的 Logsum 衡量结果
Table 5 Logsum measurement results of price attribute changes

出发时间	出行路线	选择方案	观察的概率	$\Delta p = -40\%$		
				$\pi_i^0(p_i)/\%$	标准差	ΔCS_{pi}
早高峰	路线 1	方案 4	13%	12	0.02	2.94
早高峰	路线 2	方案 5	11%	8	0.06	1.85
早高峰	路线 3	方案 6	6%	5	0.05	0.48
晚高峰	路线 1	方案 10	11%	10	0.04	3.18
晚高峰	路线 2	方案 11	7%	6	0.01	1.20
晚高峰	路线 3	方案 12	17%	18	0.02	0.80

由表 5 可见, 当价格下降后, 预测早晚高峰期间选择公共交通的 3 条路线出行者效益均有所增加, 更多出行者选择公共交通出行, 表明公共交通的票价优惠使社会福利增加. 在价格变化时, 路线 1 的政策变化带来的福利最大, 路线 2 次之, 路线 3 最小. 增加 (减少) 一个巢的单一价格属性, 该巢内部对应的方案选择概率会减少 (增大), 导致该方案的消费者剩余 (出行者效益) 减小 (增加).

3.3 非价格属性变化的 Logsum 评估结果分析

选取的非价格属性为出行时间, 在晚高峰期间, 特定的政策包括: ① 在路线 1 实行交通管控, 缓解交通拥堵, 预估该路的出行时间减少 10 min; ② 在路线 (路线) 1 实行施工抢修, 预估该路的出行

时间增加 10 min. 研究与巢“路线 (路线) 1”相关的备选方案 7 和 10 分别在出行时间增加和减少时, 出行者的福利损失和收益量 (消费者剩余变化量). 据式 (1)、(3) 和 (7) 计算原始情况的选择概率 $\pi_i^0(p_i)$ 和非价格属性变化后的概率 $\pi_i^1(p_i)$, 并使用 Logsum 方法对这两种情况的概率需求函数进行积分, 消费者剩余的结果和标准差见表 6.

从表 6 可知, 交通管控措施能增加出行者的选择效益, 施工抢修会损失出行者效益. 当出行时间减少 10 min 时, 相同价格的出行者选择概率会变大, 相应的社会福利增加; 反之出行时间增大, 选择概率变小, 福利损失. 选择小汽车出行的居民对于时间的增加或减少较为敏感, 而选择公共交通出

行方式的居民对时间的敏感性相对较弱,即使在出行时间减少的情况,出行者的效益增加,但其增加率比小汽车小. 增加(减少)一个巢的非价格属性,

该巢内部对应方案的选择概率减少(增大),导致该方案的消费者剩余(出行者效益)减小(增加).

表 6 非价格属性变化的 Logsum 方法衡量结果
Table 6 Logsum measurement results of non-price attribute changes

政策变化	出行方式	选择方案	选择概率		ΔC_i	
			$\pi_i^0(p_i)$	$\pi_i^1(p_i)$	均值	标准差
$\Delta t = -10 \text{ min}$	小汽车	方案 7	16%	18.2%	29.540	0.004
	公共交通	方案 10	10%	16.2%	0.601	0.003
$\Delta t = 10 \text{ min}$	小汽车	方案 7	16%	12.7%	-31.520	0.002
	公共交通	方案 10	10%	6.0%	-1.250	0.001

4 结 论

基于后悔理论构建随机后悔广义巢式 logit 选择模型,将出行者对价格变化的后悔行为反应作为某些特定政策所造成消费者剩余变化的度量,探讨基于 Logsum 消费者剩余衡量交通出行者效益的方法,研究取得的主要结论如下:

1) 传统基于 MNL 模型的消费者剩余度量方法没有考虑个人是有限理性的,因此,无法准确度量个人福利和社会福利. 基于 RRM-GNL 模型的 Logsum 方法能够更有效评估出行者效益,为社会福利评价提供参考和依据.

2) 构建的随机后悔广义巢式 logit 选择模型能够更有效描述出行者的决策行为特点和心理偏好. 对案例进行参数估计和拟合,结果表明,居民在属性变化时,会优先考虑变更出发时间、公共交通出行方式和成本高的路线. 该结论能够为出行者的行为决策提供实际应用分析.

3) 通过改变价格和时间属性分析随机后悔 GNL 模型预测出行效益的收益和损失. 案例结果表明,当一个巢的价格属性或非价格属性变化时,该巢内部对应方案的消费者剩余均呈不同程度的反比例变化. 模型能较好捕捉方案之间的相似性.

参考文献 / References:

- [1] JONG de G, DALY A, PIETERS M, et al. The logsum as an evaluation measure: review of the literature and new results [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2007, 41(9): 874-889.
- [2] 马书红, 汤薛艳, 叶建勇. 基于 Logsum 差异和嵌套 Logit 模型的交通出行者效益测算研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(5): 45-50, 78.
MA Shuhong, TANG Xueyan, YE Jianyong. Logsum difference and nested logit model in traveler benefits estimation [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(5): 45-50, 78. (in Chinese)
- [3] MCCONNELL K E. Consumer surplus from discrete choice models [J]. Journal of Environmental Economics and Management, 1995, 29: 263-270.
- [4] DEKKER T, CHORUS C G. Consumer surplus for random regret minimisation models [J]. Journal of Environmental Economics and Policy, 2018, 7(3): 269-286.
- [5] STANDEN C, GREAVES S, COLLINS A T, et al. The value of slow travel: economic appraisal of cycling projects using the logsum measure of consumer surplus [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2019, 123: 255-268.
- [6] CHEN A, PRAVINVONGVUTH S, XU Xiangdong, et al. Examining the scaling effect and overlapping problem [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2012, 46(8): 1343-1358.
- [7] WEN C, KOPPELMAN F S. The generalized nested logit model [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2001, 35: 627-641.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61803113); 桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目(2020YCXSI22)

作者简介: 李梦洁(1995—), 桂林电子科技大学硕士研究生. 研究方向: 交通行为经济学与交通管理规划.
E-mail: lmjandlqz@gmail.com

引文: 李梦洁, 陈富坚, 林钦泽. 基于随机后悔广义巢式 logit 的出行效益评估方法[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(2): 128-135.

- [8] 马书红, 周烨超, 张 艳. 基于 NL-累计前景理论的出行方式选择预测模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(4): 135-142.
- MA Shuhong, ZHOU Yechao, ZHANG Yan. Travel mode choice forecasting based on nested logit-cumulative prospect theory model [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(4): 135-142. (in Chinese)
- [9] 杨励雅, 李 娟. 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[J]. 北京大学学报自然科学版, 2017, 53(4): 722-730.
- YANG Liya, LI Juan. Cross-nested logit model for the joint choice of residential location, travel mode, and departure time [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2017, 53(4): 722-730. (in Chinese)
- [10] 李雪飞. 基于扩展 Logit 的交通分配模型与算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- LI Xuefei. Study on traffic assignment models and algorithms based on extended logit models [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [11] CHORUS C, CRANENBURGH S, DEKKER T. Random regret minimization for consumer choice modeling: assessment of empirical evidence [J]. Journal of Business Research, 2014, 67(11): 2428-2436.
- [12] CRANENBURGH S V, CHORUS C G. Does the decision rule matter for large-scale transport models [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2018, 114: 338-353.
- [13] 李 梦, 黄海军. 后悔视角下的多用户多准则随机用户均衡模型[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(5): 1322-1330.
- LI Meng, HUANG Haijun. Multi-class, multi-criteria stochastic user equilibrium model under regret theory view [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2017, 37(5): 1322-1330. (in Chinese)
- [14] GUEVARA C A, FUKUSHI M. Modeling the decoy effect with context-RUM models: diagrammatic analysis and empirical evidence from route choice SP and mode choice RP case studies [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 93: 318-337.
- [15] BIERLAIRE M. BIOGEME: a free package for the estimation of discrete choice models [C]// The Third Swiss Transportation Research Conference. Ascona, Switzerland: EPFL, 2003: 1-24.
- [16] BIERLAIRE M. PythonBiogeme: a short introduction [R/OL]. (2016-07-06) [2020-04-10]. <https://infoscience.epfl.ch/record/221362>.

【中文责编: 方 圆; 英文责编: 淡 紫】