文章编号:1005-0523(2022)05-0061-09

考虑动态交通信息的异质出行行为分析

万 明,梁 莹,周涂强,严利鑫,郭军华,李芳源

(华东交通大学交通运输工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:为了定量分析交通事故引起的高速公路动态拥堵交通信息和出行者异质性对出行选择行为的影响,依据在日本西部地区对2 500名高速公路出行者进行的大规模SP/RP调查数据,采用潜在类别分析方法得到出行者对高速公路动态交通信息的偏好特征;将得到的分组结果作为解释变量纳入多水平模型中。结果表明:通过对数据进行潜在类别分析,出行者可划分为3类异质群体,即动态交通信息高依赖组、动态交通信息低依赖组和动态交通信息无依赖组,占比分别为38.8%,36.1%,25.1%,并且不同交通信息依赖组的出行者在性别、年龄和职业上分布差异均具有统计学意义;不同交通信息依赖组的出行者在动态交通信息下的出行行为有明显差异;考虑数据分层结构的出行预测模型比不考虑数据分层结构的预测模型预测结果更准确。

关键词:城市交通;出行者异质性;出行行为;潜在类别分析;多水平模型

中图分类号:U268.6 **文献标志码**:A

本文引用格式:万明,梁莹,周涂强,等. 考虑动态交通信息的异质出行行为分析[J]. 华东交通大学学报,2022,39(5):61-69.

Heterogeneous Travel Behavior Analysis Considering Dynamic Traffic Information

Wan Ming, Liang Ying, Zhou Tuqiang, Yan Lixin, Guo Junhua, Li Fangyuan

(School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to quantitatively analyze the influence of highway dynamic congestion traffic information caused by traffic accidents and traveler heterogeneity on travel choice behavior, a large-scale SP/RP survey data covering 2 500 highway users in west Japan is used for this study. Latent class analysis(LCA) is adopted for extracting different preference features on traffic information, followed by a multilevel model which sets the results of LCA as explanatory variable. The research results show that: Through the potential category analysis of the data, travelers can be divided into three types of heterogeneous groups, namely, dynamic traffic information high dependence group, dynamic traffic information low dependence group and dynamic traffic information independent group, accounting for 38.8%, 36.1% and 25.1%. And there are significant differences in gender, age and occupation among these groups. The travel behaviors of travelers in different traffic information dependence groups are significantly different under dynamic traffic information. The travel prediction model considering data hierarchical structure is more accurate than the prediction model without data hierarchical structure.

Key words: urban traffic; traveler heterogeneity; travel behavior; latent class analysis; multilevel model

Citation format: WAN M, LIANG Y, ZHOU T Q, et al. Heterogeneous travel behavior analysis considering dynamic traffic information[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(5): 61-69.

收稿日期:2021-12-07

基金项目:国家自然科学基金项目(52062015,51805169,52162049);江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ200670);江西省研究生科研创新项目(YC2020-S308)

随着各城市群内部经济社会交流日渐紧密，城际交通需求迅速增长[1]。高速公路作为城际交通重要的出行方式之一，发挥着至关重要的作用[2]。为了避免高速公路交通事故引起的交通拥堵造成较大的经济损失，有必要对高速公路出行行为展开研究[3-4]。

随着智能交通信息技术的不断发展，交通信息在调节交通流方面的作用日益突出[5-6]。但在有关高速公路出行的研究中，多聚焦于节假日[7]、收费政策[8]等，对交通信息影响下不同交通信息偏好出行者高速公路出行行为的研究较少。

在出行行为分析的研究中，学者发现个体异质性对出行者选择行为有着显著影响[9-10]。潜在类别分析(latent class analysis，LCA)是一种能够有效解释个体异质性的方法[11-12]，被广泛应用在医学、心理学和社会学的研究上。目前，该方法在交通领域中的应用尚处于初级阶段，主要集中于交通行为分析[13]。Saxena 等[14]研究了不同出行者群体在波动交通流的影响下出行选择行为。范爱华等[15]基于 LCA 将出行者划分为 3 类异质出行群体：低出行与方式均衡组、中高出行与小汽车偏好组和高出行与绿色交通组。部分学者通过心理因素、行为等对出行者进行潜在类别(Latent class)划分，将潜在类别划分置入 Logit 模型中。通过这种方法对出行者进行类别划分，不仅有更坚实的理论基础，而且可以提高模型的拟合度[16-18]。

以上的研究中普遍采用一般的离散选择模型[19]，没有考虑到数据的层次结构，忽略了群体间异质性问题，可能得到有偏误的结论。多水平模型是在固定效应模型和随机效应模型等方差成分分析上发展起来的，允许观测值间相关和方差不齐性，是能够分析和处理具有层次结构特征数据的有力工具[20]。

为了量化分析高速公路动态交通事故信息对不同交通信息异质性出行者出行行为的影响，基于大规模 RP/SP 调查数据，采用潜在类别分析(LCA)对出行者交通信息异质性进行划分，之后综合考虑个人属性、出行属性和交通信息异质性等多方面影响因素，构建多水平模型分析信息偏好类型、社会经济属性和出行属性等影响因素对出行行为的影响程度。

1 基本原理

首先依据大规模调查数据对出行者的交通信息偏好类型进行划分。然后，将群组层面因素(信息偏好类别)与个人层面因素(个人属性、出行属性)共同构建了多水平模型，用来分析不同类别出行者出行行为的变化程度以及不同类别出行者的社会经济属性和出行属性等影响因素的影响作用程度。模型框架如图 1 所示。

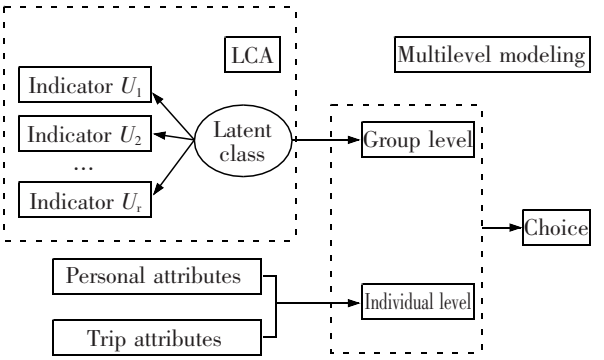


图 1 模型框架

Fig.1 Model framework

1.1 潜在类别分析

与传统的统计分析模型不同，首先，潜在类别分析通过间断的潜变量即潜在类别变量来解释外显指标间的关联，使外显指标间的关联通过潜在类别变量来估计，进而维持其局部独立性的统计方法，更适合分析类别变量[21]。其次，潜在类别分析不需要提前决定群体数，并且不需要剔除变量。其基本假设是，外显变量各种反应的概率分布可以由少数互斥的潜在类别变量来解释，每种类别对各外显变量的反应选择都有特定的倾向[22]。

假定 N 为样本数量，J 为指标数量，各有 K_j 个水平；C 为潜在类别数量。$Y_{n,j,k}$ 表示虚拟变量，如果个体 $n(n=1,\cdots,N)$ 在指标 $j(j=1,\cdots,J)$ 上选择了水平 $k(k=1,\cdots,K_j)$ 则为 1，否则为 0。p_c 表示潜在类别 $c(c=1,\cdots,C)$ 所占总体的概率，$\sum_c p_c=1$。$\pi_{n,j,k}$ 表示指标 j 在类别 c 上取值为 k 的类别-条件概率，$\sum_{k=1}^{K_j}\pi_{n,j,k}=1$。

根据局部独立性假设，各类别内部联合概率为

$$p(n|c)=\prod_{j=1}^{J}\prod_{k=1}^{K_j}\pi_{n,j,k}^{Y_{n,j,k}} \tag{1}$$

所有类别的联合概率可以表示为

$$p(n)=\sum_{c=1}^{C}p_c p(n|c) \tag{2}$$

采用极大似然估计方法（Maximum likelihood）进行参数估计。分类依据为贝叶斯后验概率,则个体 n 属于类别 c 的概率为

$$p(c|n)=\frac{p_c p(n|c)}{p(n)} \tag{3}$$

确定模型潜在类别个数是模型重点。模型的适配检验指标主要有 Pearson 卡方检验、似然比卡方 G2(LL)检验、信息评价指标(AIC、BIC)和样本校正的 BIC(aBIC)。这几种拟合适配指标都是统计值越小表示模型的拟合度越好[18]。信息熵 Entropy 也常用来评价分类精确度,取值范围为 0~1,值越大,分类越精确。还有似然比检验(LMR)和基于 Bootstrap 的似然比检验(BLRT)两个指标,当 LMR 和 BLRT 值的显著性水平达到显著时,表明分类为 c 个类别的模型显著的优于分类为 $c-1$ 个类别的模型。

1.2　多水平分析模型

多水平模型又被称为混合效应模型,充分考虑了数据的层次结构,适用于处理具有层次结构或嵌套式结构的数据。其中部分或全部参数由固定效应和随即效应两部分组成,将单一的随机误差项分解到数据层次结构的各个水平上,从而能得到每个层次上的解释信息,使得分析更完善和更准确。

研究数据为两水平层次数据结构,水平 1 为分组水平（即出行者偏好分组）,水平 2 为个人水平(包括个人基本属性和出行属性等)。假定样本共有 N 个个体,可以按照一定标准将总样本分为 J 个群组,每个群组中有 I 个个体。y_{ij} 表示第 j 群组中第 i 个体的出行选择;$\log\pi_{ij}$ 表示第 j 群组中第 i 个体出行选择结果 y_{ij} 为阳性的概率,范围为(0,1);x_{ij} 表示多水平模型中水平 1 的解释变量;β_{0j},β_{1j} 表示水平 1 的回归系数,其中 β_{0j} 为水平 1 的截距,β_{1j} 为 x_{ij} 的固定效应参数;γ_{00},γ_{01} 表示水平 2 的截距;μ_{0j},μ_{1j} 表示随机效应,服从正态分布。

首先,建立零模型,即不包括解释变量。零模型可以表示为

$$y_{ij}\sim \log\pi_{ij}=\beta_{0j} \tag{4}$$

$$\beta_{0j}=\gamma_{00}+\mu_{0j},\mu_{0j}\sim N(0,\sigma_\mu^2) \tag{5}$$

其次,将水平 2 解释变量和水平 1 解释变量加入零模型。鉴于水平 2 无解释变量,最终模型可以表示为

$$y_{ij}\sim\log\pi_{ij}=\beta_{0j}+\beta_{1j}X_{1j} \tag{6}$$

$$\beta_{0j}=\gamma_{00}+\mu_{0j} \tag{7}$$

$$\beta_{1j}=\gamma_{10}+\mu_{1j} \tag{8}$$

式中:$\begin{bmatrix}\mu_{0j}\\ \mu_{1j}\end{bmatrix}\sim N\left[\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix},\begin{pmatrix}\sigma^2_{\mu_0} & \sigma^2_{\mu_{01}}\\ \sigma^2_{\mu_{01}} & \sigma^2_{\mu_1}\end{pmatrix}\right]$。

运用最大似然估计法（Maximum likelihood method)对多水平模型进行参数估计。

2　研究数据

为了研究动态交通信息影响下出行者异质性出行行为,在日本西部地区进行了大规模网络问卷调查数据,共获取了 2 500 份有效问卷。

调查问卷分为两部分组成:揭示性偏好(RP)调查和声明偏好(SP)调查。其中,RP 调查反映了每个被调查者的个人出行经历和对出行信息的偏好。相关题目设置来源于文献调查和高速公路专家意见,主要内容包括:车辆使用情况(如频率和用途),高速公路使用情况(如频率、用途),对交通信息的需求,个人社会经济属性等。SP 调查主要依据了 RP 调查获得的被调查者真实的高速公路使用体验、交通信息偏好等以及动态交通事故信息,采用正交试验设计调查内容,并对同样的 2 500 名被调查者进行了调查。主要调查内容包括:事故条件因素(从入口匝道到事故现场的距离和事故严重程度信息),事故影响因素(队列长度和队列变化趋势),交通管理因素(交通管制、预计拥挤时间、拥堵清除时间的准确性、在一定时间内清除拥堵的概率)。

选取了个人基本社会经济属性(性别、年龄、学历和职业)、出行属性(出行目的、出行距离、交通事故严重性、到事故现场的距离、消除交通堵塞的预测时间）以及出行者交通信息异质性共同构建模型。个人社会经济基本属性、出行属性相关变量及其分类如表 1 所示。

为描述出行者交通信息异质性,从调查数据中选取了 8 个表征出行者信息偏好的外显变量,如表 2 所示,均为两个等级:是、否。

表1 变量及其分类
Tab.1 Variables and its classification

Number	Variables	Classification
1	Gender	0:female;1:male
2	Age	1:≤35 years old;2:36–59 years old;3:≥60 years old
3	Education	1:bellow bachelor;2:bachelor;3:above bachelor
4	Occupation	1:manager;2:professional and technical personnel;3:social production service and life service personnel;4:manufacturing and related personnel;5:others
5	Travel purpose	0:no time constraint;1:time constraint
6	Travel distance	Continuous data in km
7	Accident severity	1:fatal accidents;2:not fatal accidents;0:others
8	Distance to site	Continuous data in km
9	Clear time	Continuous data in min
10	Choice	0:not change;1:change

表2 交通信息异质性外显变量
Tab.2 Manifest variables of traffic information heterogeneity

Manifest variables	Classification
Even you don't collect any travel information before depature, you will somehow get to the destination first	0:no;1:yes
Regarding travel information, it is useful to have a smooth activity	
You will collect travel information as detailed as possible	
Regarding travel information, you only prefer real time information	
Prefer travel information from internet rather than experience	
Regarding travel information providers, you like to compare with different sites	
If extra information (weather, entertainment or news) is not provided, you will not use travel information	
If it is easy to get travel information about highway, you will use highway more frequently	

3 出行者潜在类别分析

运用MPLUS软件对出行者交通信息偏好进行潜在类别分析，采用极大似然估计法进行参数估计，抽取分类为1~6个潜在类别的模型拟合信息指数汇总如表3所示。从表3中可以看出，似然比卡方G2(LL)检验指标、Pearson卡方检验指标和AIC指标都随着潜在类别数的不断增加而减少，但是始终没有达到最低值。针对这种单调递减的情况，可以采用数据拐点对模型指标进行检验。此外，保留4个潜在类别时达到最小的BIC值(22 830.4)和aBIC值(22 719.2)，但与分类分别为3个潜在类别、5个潜在类别、6个潜在类别的模型检验指数相比区别不大，也采取数据拐点进行检验。结果显示，在分类为两个潜在类别时指标数值存在明显的拐点。结合以上信息，支持保留分类为两个潜在类别的模型。然而，分类为3个潜在类别时的Entropy值(0.781)最大。并且LMR和BLRT的结果也不一致，结果显示，分类为4个潜在类别时模型的LMR指标不显著，支持保留分类为3个潜在类别的模型，而BLRT指标一直显著。从这些指标来看，支持保留分类为3个潜在类别的模型。

表 3　出行者交通信息偏好潜在类别分析拟合信息汇总表

Tab.3　LCA fitting information for travelers traffic information preference

Class	*k*	G2(LL)	*df*	χ^2	AIC	BIC	aBIC	Entropy	LMR	BLRT
1C	8	1 506.2	247	3 453.0	23 793.4	23 840.0	23 814.6	–	–	–
2C	17	600.3	238	796.8	22 905.5	23 004.5	22 950.5	0.581	<0.000 1	<0.000 1
3C	26	405.2	229	657.4	22 728.4	22 879.8	22 797.2	**0.781**	<0.000 1	<0.000 1
4C	35	285.4	220	350.7	22 626.6	**22 830.4**	**22 719.2**	0.695	0.019 5	<0.000 1
5C	44	245.9	211	297.2	22 605.1	22 861.4	22 721.6	0.713	0.736 2	<0.000 1
6C	53	**213.8**	202	**221.9**	**22 591.0**	22 899.7	22 731.3	0.721	0.016 7	<0.000 1

Note:best values are bold.

统计指数只能提供决策参考,在确定最佳模型时还需要考虑各类别的可解释性,所以对 2 个潜在类别模型和 3 个潜在类别模型进行比较,如表 4 所示。根据表 4 的潜在类别划分依据,模型分别保留 2个潜在类别和 3 个潜在类别时,第 2 类(2C)和第 3 类(3C)的条件概率分布比较一致,说明这两个类别在不同的模型中比较稳定。在 3 个潜在类别的模型中,第 1 类(3C)和第 2 类(3C)可以看作由两个潜在类别模型的第 1 类(2C)分离出来的。具体来看,3个潜在类别的模型中的第 1 类和第 2 类在外显变量 1,3,5,6 和 8 上的条件概率有差异,综合考虑后选择 3 个潜在类别的模型为最佳模型[19]。

表 4　潜在类别划分依据

Tab.4　Classification standard of the latent class

%

Variables		2C corresponding probability		3C corresponding probability		
		Class 1	Class 2	Class 1	Class 2	Class 3
1	0	67.9	66.4	76.7	50.6	77.0
	1	32.1	33.6	23.3	49.4	23.0
2	0	92.8	98.3	91.1	97.0	97.7
	1	7.2	1.7	8.9	3.0	2.3
3	0	39.8	88.4	0.0	100.0	86.9
	1	60.2	11.6	100.0	0.0	13.1
4	0	41.1	79.8	44.2	45.7	87.3
	1	58.9	20.2	55.8	54.3	12.7
5	0	53.7	81.6	53.4	60.6	85.6
	1	46.3	18.4	46.6	39.4	14.4
6	0	28.1	81.5	25.2	44.9	87.8
	1	71.9	18.5	74.8	55.1	12.2
7	0	12.8	47.8	14.3	13.2	62.1
	1	87.2	52.2	85.7	86.8	37.9
8	0	52.3	90.5	51.9	62.4	95.1
	1	47.7	9.5	48.1	37.6	4.9

根据3个潜在类别在题目上的作答特点,3种类别的出行者在外显变量2上的比例都比较低,说明出行者对于高速公路交通信息认可度不高。Class 1的出行者在外显变量3,4,5,6,7和8上比例较高,会搜集尽可能详细的交通信息,并且对信息的内容和方式有要求,表现出对交通信息的高度依赖,命名为:“高动态交通信息依赖组”;Class 2的出行者在外显变量1上比例较高,偏好出行前交通信息,会在出行前收集交通信息,对交通信息的内容和方式要求不高,没有表现出对动态交通信息的高依赖,命名为:“低动态交通信息依赖组”;Class 3的出行者在所有的外显变量上都具有较低的条件概率,没有表现出对交通信息的依赖,命名为:“无动态交通信息依赖组”。Class 1,Class 2,Class 3占样本的比重分别为38.8%,36.1%,25.1%。并且,通过潜在类别分布比较,不同性别、年龄和职业的出行者交通信息偏好的潜在类别分布差异具有统计学意义(P<0.05),如表5所示。

表5 不同个体属性出行者交通信息偏好的潜在类别分布比较

Tab.5 Comparison of latent class for different individual traffic information preference

Individual variables	Classification	Sample size	Class 1	Class 2	Class 3	χ^2	P
Gender	0	1 249	533	474	242	6.169	0.046
	1	1 251	481	486	284		
Age	1	662	214	248	200	54.034	<0.001
	2	1 268	537	496	235		
	3	570	263	216	91		
Education	1	1 286	548	489	249	9.504	0.050
	2	1 063	418	406	239		
	3	151	48	65	38		
Occupation	1	169	61	76	32	28.668	<0.001
	2	377	127	146	104		
	3	471	192	169	110		
	4	347	144	121	82		
	5	1 136	490	448	198		

4 多水平模型分析

为定量分析高速公路动态交通事故信息以及不同交通信息异质性对出行者出行行为的影响,综合考虑出行者个人社会经济属性、出行属性和由第3节得到的出行者信息偏好分组变量共10个变量,构建多水平模型。其中,出行信息偏好分组为水平2(Group level)分组,其他变量为水平1(Individual level)变量。

多水平模型固定效应检验结果如表6所示,可见不同偏好类型的出行者在出行选择行为上有差异(F=22.614,P<0.001),模型具有统计学意义。固定效应项中Gender(F=6.369,P=0.007),Age (F=71.852,P<0.001),Education (F=66.652,P<0.001),Occupation (F=2.397,P=0.024),Accident severity (F=15.736,P<0.001)和Distance to site (F=4.594,P=0.034)的效应有统计学意义。而Trip purpose(F=0.137,P=0.699)和Trip distance (F=3.215,P=0.087)的效应无统计学意义。

表 6　固定效应
Tab.6　Fixed effect

Fixed effect	*df*1	*df*2	*F*	*P*
Corrected model	14	2 486	22.614	0.000
Gender	1	2 486	6.369	0.007
Age	2	2 486	71.852	0.000
Education	2	2 486	66.652	0.000
Occupation	4	2 486	2.397	0.024
Trip purpose	1	2 486	0.137	0.699
Trip distance	1	2 486	3.215	0.087
Accident severity	2	2 486	15.736	0.000
Distance to site	1	2 486	4.594	0.034
Clear time	1	2 486	8.458	0.004

为了检验多水平模型对层次结构数据的预测能力,对一般离散选择模型和多水平模型的预测拟合评价指标如表 7 所示。由表中数据可知,多水平模型在判断正确率(TPR=0.833, FPR=0.343)和预测精度(*F*–Measure=0.735)都高于一般离散选择模型的指标(TPR=0.706, FPR=0.328,*F*–Measure=0.700),较为优异。结果表明,多水平模型比一般的离散选择模型更适合分析层次结构数据。

表 7　模型拟合评价指标
Tab.7　Model fitting assessment index

Index	Discrete model	Multilevel model
TPR	0.706	0.833
FPR	0.328	0.343
Precision	0.704	0.657
Recall	0.706	0.833
F–Measure	0.700	0.735

多水平模型的参数标定结果如表 8 所示。本模型选择第一种类别作为基线。结果显示,在个人属性方面,性别、年龄、学历对出行选择行为有显著影响。其中,性别和学历有负向显著影响作用,而年龄有正向显著影响作用。这表明,女性比男性更倾向于改变出行计划;随着年龄增长,出行者更容易改变出行计划;随着学历的提高,出行者不太会改变出行计划。

在出行属性方面,交通事故严重性和预计交通拥堵时间对出行者改变出行计划有正向显著影响作用,距事故点距离对出行计划的改变有负向显著影响作用。这表明,交通事故程度越严重、预计交通拥堵时间越长、距事故点距离越远时,出行者改变其出行计划的意愿越高。

表 8　参数标定结果
Tab.8　Parameter calibration results of multilevel modeling

Varlables classification		Coefficient	Standard error	*t*
Intercept		–0.135	0.381	–0.356
Gender	0	0[a]	–	–
	1	–0.266	0.106	–2.524
Age	1	0[a]	–	–
	2	1.096	0.108	10.187
	3	1.430	0.133	10.724
Education	1	0[a]	–	–
	2	–0.775	0.095	–8.184
	3	–2.342	0.239	–9.799
Occupation	1	0[a]	–	–
	2	0.018	0.208	0.088
	3	–0291	0.199	–1.458
	4	–0.291	0.209	–1.392
	5	–0.365	0195	–1.873
Accident severity	0	0[a]	–	–
	1	0.394	0.103	3.827
	2	0.628	0.117	5.351
Distance to site		–0.003	0.001	–2.143
Clear time		0.003	0.001	2.908

Note:a,this parameter is redundant,so it is set to 0.

5 结论

基于实际调查数据,运用潜在类别分析方法探索了出行者交通信息潜在类别,并将分组结果作为变量与个人属性、出行属性共同构建出行行为多水平模型,探索了动态交通事故信息影响下异质性出行行为,得出以下结论。

1)根据潜在类别分析将出行者分为不同的交通信息类型:动态交通信息高依赖组、动态交通信息低依赖组、动态交通信息无依赖组,占比分别为38.8%、36.1%、25.1%。并且3种类别的出行者在性别、年龄和职业的交通信息异质性分布差异均具有统计学意义。

2)将出行者个人属性、出行属性以及交通信息异质性潜在类别作为解释变量,出行行为作为被解释变量,构建多水平模型。并将其预测结果与一般离散选择模型的预测结果进行对比,发现考虑层次数据结构的多水平模型具有更好的模型预测效果。

3)通过多水平模型结果可以得知,不同交通信息异质性的出行者在动态交通信息下的出行行为有明显差异。其中,性别和学历有负向显著影响作用,而年龄有正向显著影响作用。并且,交通事故程度越严重、预计交通拥堵时间越长、距事故点距离越远时,出行者改变其出行计划的意愿越高。

4)不同出行者对动态交通信息的偏好不同,并且进行出行决策时会受到个人异质性、社会经济属性、出行属性的影响。这与实际情况相符。通过调节动态交通信息的发布可以改变出行者出行行为,从而改善高速公路交通流状况,在一定程度上避免高速公路交通事故引起的交通拥堵造成较大的经济损失。

参考文献:

[1] 陶思然,叶霞飞. 引入母子公司关联因素的城际客运出行分布预测模型[J]. 同济大学学报(自然科学版),2020,48(9):1319-1327.
TAO S R,YE X F. Forecasting model of intercity trip distribution with consideration of connections between headquarters and subsidiaries[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2020,48(9):1319-1327.

[2] 梁安宁,黄娜娜,张兵,等. 基于NL模型的昌九客运交通方式选择分析[J]. 华东交通大学学报,2020,37(1):54-60.
LIANG A N,HUANG N N,ZHANG B,et al. Analysis on choice of Changjiu passenger transport mode based on NL model[J]. Journal of East China Jiaotong University,2020,37(1):54-60.

[3] JIANG Y,ZHANG J. How drivers adapt to traffic accidents and dynamic travel information:Stated preference survey in japan[J]. Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board,2014,2413:74-83.

[4] JIANG Y,ZHANG J. Drivers′ travel information styles and adaptation behaviors to dynamic travel information about accidents on expressways[J]. Asian Transport Studies,2016,4:444-459.

[5] ERAN B E,EREL A,et al. Response to travel information:A behavioural review[J]. Transport Reviews A:Transnational Transdisciplinary Journal,2015,35:352-377.

[6] HAN Y,ZHANG T,WANG M. Holiday travel behavior analysis and empirical study with integrated travel reservation information usage[J]. Transportation Research Part A:Policy and Practice,2020,134:130-151.

[7] 马莹莹,陆思园,张晓明,等. 考虑个体风险偏好差异的高速公路出行选择模型[J]. 吉林大学学报(工学版),2021,51(5):1673-1683.
MA Y Y,LU S Y,ZHANG X M,et al. Model of highway travel selection considering individual risk preference difference[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition),2021,51(5):1673-1683.

[8] 林小梅,邵春福,董春娇,等. 节假日公路免费政策下城际交通行为特性[J]. 交通运输系统工程与信息,2019,19(2):247-254.
LIN X M,SHAO C F,DONG C J,et al. The behavior characteristics of inter-city travel under the implication of expressway toll-free policy during holiday[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2019,19(2):247-254.

[9] 杨飞,侯宗廷,王亮,等. 考虑个体异质性的汽车分时租赁选择行为[J]. 西南交通大学学报,2022,57(4):745-752.
YANG F,HOU Z T,WANG L,et al. Choice behavior of time-sharing vehicles leasing considering individual heterogeneity[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2022,57(4):745-752.

[10] 赵鹏,翟茹雪,宋文波. 考虑个体异质性的高速铁路旅客选择行为[J]. 北京交通大学学报,2019,43(2):117-123.
ZHAO P,ZHAI R X,SONG W B. Passenger choice behavior of high-speed railway considering individual heterogeneity[J]. Journal of Beijing Jiaotong University,2019,43(2):117-123.

[11] 刘建荣,郝小妮. 考虑出行者异质性的绿色出行行为研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2019. 47(7):99–104.
LIU J R,HAO X N. Incorporating the heterogeneity into travelers′ green traveling choice model[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition),2019,47(7):99–104.

[12] 周伊冰,霍娅敏,张奕源. 基于潜在类别分析的城市轨道交通通勤市场细分研究[J]. 综合运输,2021,43(9):9–16.
ZHOU Y B,HUO Y M,ZHANG Y Y. Market segmentation of urban rail transit commuter based on latent class analysis[J]. China Transportation Review,2021,43(9):9–16.

[13] 杨洋,张锐. 基于潜在类别分析的停车换乘行为影响因素分析[J]. 综合运输,2018,40(7):64–68.
YANG Y,ZHANG R. P&R mode choice indicators study based on the latent class analysis[J]. China Transportation Review,2018,40(7):64–68.

[14] SAXENA N,RASHIDI T H,DIXIT V V,et al. Modelling the route choice behaviour under stop–&–go traffic for different car driver segments[J]. Transportation Research Part A:Policy and Practice,2019,119(1):62–72.

[15] 范爱华,陈旭梅. 基于潜在类分析的城市异质出行群体识别研究[J]. 北京交通大学学报,2021,45(1):62–69.
FAN A H,CHEN X M. Identification of heterogeneous urban travelers groups based on latent class cluster analysis[J]. Journal of Beijing Jiaotong University,2021,45(1):62–69.

[16] YAZDANPANAH M,HOSSEINLOU M H. The influence of personality traits on airport public transport access mode choice:A hybrid latent class choice modeling approach[J]. Journal of Air Transport Management,2016,55(8):147–163.

[17] HURTUBIA R,NGUYEN M H,GLERUM A,et al. Integrating psychometric indicators in latent class choice models[J]. Transportation Research Part A,2014,64(6):135–146.

[18] 刘志伟,刘建荣,邓卫. 考虑潜在类别的市内机动化出行行为模型[J]. 西南交通大学学报,2021,56(1):131–137.
LIU Z W,LIU J R,DENG W. Inclusion of latent class in behavior model of motorized travel in city[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2021,56(1):131–137.

[19] 关宏志. 非集计模型:交通行为分析的工具[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
GUAN H Z. Non aggregate model:A tool for traffic behavior analysis[M]. Beijing:China Communications Press,2004.

[20] 金芳,倪宗瓒,李晓松,等. 多元多水平模型及其在儿童生长发育研究中的应用[J]. 中国卫生统计,2004(4):13–15.
JIN F,NI Z Z,LI X S,et al. Multivariate multilevel model and its application in the study of children′s growth and development[J]. Chinese Journal of Health Statistics,2004,(4):13–15.

[21] 胡汉. 考虑数据异质性的高速公路交通事故关联规则挖掘研究[D]. 西安:长安大学,2020.
HU H. Study on association rules mining of expressway traffic accidents considering data heterogeneity[D]. Xi′an:Chang′an University,2020.

[22] 邱皓政. 潜在类别模型的原理与技术[M]. 北京:教育科学出版社,2008.
QIU H Z. Principle and technology of latent category model[M]. Beijing:Education Science Press,2008.



第一作者:万明(1961—),教授,硕士研究生导师,研究方向为高铁与区域经济,轨道交通规划,轨道运输规划与管理。E-mail:wanming@ecjtu.edu.cn。



通信作者:梁莹(1997—),硕士研究生,研究方向为出行行为,交通运输规划与管理。E-mail:2632720939@qq.com。

(责任编辑:吴海燕　刘棉玲)