

重大节假日出行方式选择模型研究

何永明¹,张磊¹,魏堃²,曹剑¹,王锦扬¹

(1. 东北林业大学 交通学院,黑龙江 哈尔滨 150040;2. 长安大学 道路结构与材料交通运输行业重点实验室,陕西 西安 710000)

摘要:为优化节假日高速公路免费政策,选取出行者变量、出行方式相关变量和行程特性变量作为效用变量,构建了出行方式位于上层、出行距离位于下层的NL模型。利用弧弹性法分析不同收费标准和收费里程条件下出行者的行为特性,并利用场景仿真评价多种收费组合对出行方式的影响。研究结果表明:提高收费标准,汽车出行比例会显著降低,且高速铁路承担了大部分的转移交通量。随着收费里程的增加,出行者逐渐倾向于出行成本较小的普通铁路。对长距离出行收费可以提升公共交通分担率,缓解节假日高速公路的交通拥堵。

关键词:节假日出行;免费政策;Nested Logit模型;出行方式;场景仿真

文献标识码:A **DOI:**10.13291/j.cnki.djdxac.2024.01.002

2012年,国务院发布了《国务院关于批转交通运输部等部门重大节假日免收小型客车通行费实施方案的通知》,规定在重要节假日(春节、清明节、劳动节和国庆节)期间对小型车辆实行高速公路免费政策。该政策的出台推动了更多出行者在重要节假日期间选择高速公路出行。然而随着该政策的持续实施以及节假日交通量的不断增大,高速公路出现了严重的交通拥堵现象^[1],由此引发的各类交通事故、资源浪费及环境恶化等问题也日益严重^[2]。造成该现象的一个重要原因是缺乏对节假日期间出行特征的深入研究,没有具体地分析免费政策对出行选择的影响。

出行特征是交通领域的重要研究内容,主要包括出行距离、出行方式和出行频次等^[3]。为合理引导交通需求空间分布,避免加剧节假日期间高速公路的交通拥堵,基于不同的出行特征建立联合选择模型,探讨节假日免费政策优化方向,是非常有必要的。在公路收费政策制定方面,学者们提出了分里程收费^[4]、分时段收费^[5]以及拥堵收费^[6]等策略。从方法论而言,建立的模型包括多项Logit模型^[7]、潜在类别模型^[8]和贝叶斯网

络模型^[9]等。在多种出行联合选择模型中,巢氏Logit(Nested Logit, NL)模型克服了传统Logit模型的IIA特点,可充分考虑备选方案之间的相关性,被广泛用于出行预测分析。

基于以上分析,以NL模型为基础,结合2019年湖南省五一节假日期间出行调查问卷,构建出行方式与出行距离联合选择模型。通过该模型设计多种分里程免费政策,考察不同仿真场景下出行方式的变化,提高公共交通分担率,缓解节假日高速公路交通压力。

1 样本数据及特征

1.1 数据采集

以2019年湖南省五一节假日期间出行调查问卷数据为基础,研究出行者个人属性和收费政策对出行选择的影响。为详细分析不同因素对节假日出行选择的影响,调查问卷将影响因素分为个人属性及出行属性两类。个人属性包含性别、年龄、家庭人均年可支配收入及是否拥有汽车;出行属性包括节假日出行目的、节假日出行方式及

收稿日期:2023-03-04

基金项目:道路结构与材料交通运输行业重点实验室开放基金项目(300102212504);东北林业大学碳中和专项科学基金项目(T20221011)

第一作者:何永明(1979—),男,副教授。E-mail:hymjob@nefu.edu.cn

通信作者:魏堃(1986—),男,副教授。E-mail:weikun@chd.edu.cn

出行距离^[10]。共采集节假日出行调查问卷 635 份作为数据样本,问卷中出行者的基本统计信息见表 1。

表 1 样本基本统计信息

数据项	数据描述	占比/%
性别	男	49.84
	女	50.16
年龄/岁	<18	1.73
	[18,25)	16.98
	[25,60)	66.98
	≥60	14.31
家庭人均年可支配收入/元	<40 000	24.06
	[40 000,80 000)	45.13
	≥80 000	30.81
是否拥有汽车	是	73.43
	否	26.57
节假日出行目的	放松休闲	57.38
	探亲访友	33.03
	工作出差	9.59
节假日出行方式	普通铁路	11.97
	高速铁路	28.03
	汽车	50.08
	飞机	9.92
出行距离/km	<250	20.47
	[250,500)	50.71
	≥500	28.82

本次调查中拥有汽车的受访者高达 73.43%,可见本样本成功捕捉到节假日期间受免费政策影响的主要出行群体。

1.2 数据特征

对表 1 中的样本数据特征进行分析,从出行方式分担率来看,汽车和铁路出行比例超过 90%,为节假日出行的主要方式。出行距离的远近直接影响城际间相互作用的覆盖范围,是研究节假日城际交通特征的重要因素。五一节假日时间较短,出行邻近效应明显,出行距离可划分为三个等级^[11]。由表 1 可知,选择中等距离([250,500) km)出行的人数较多,表明城际间相互作用明显。为研究五一节假日期间城际交通空间分布特征,对出行方式及出行距离进行联合统计,得到交通量空间分布,见图 1。

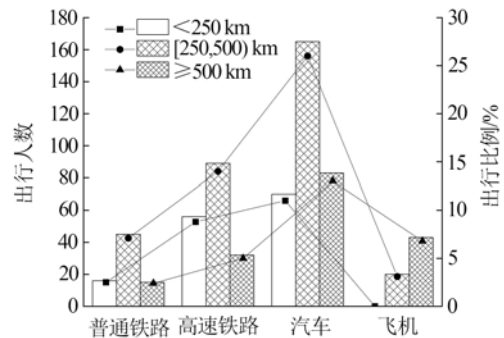


图 1 交通量空间分布

图 1 反映了选择不同出行方式的出行距离比例分布。出行距离在 250~500 km 范围内的人数最多,符合五一节假日出行的邻近效应。选择汽车出行的人数最多,在 500 km 以内的距离上具有明显优势。选择飞机出行的人数最少,且多数出行者更希望完成一次长距离(≥500 km)的出行。铁路运输适用于不同等级的出行距离,但和选择汽车出行的人数相比数量较少。因此,有必要对节假日免费政策进行优化,促进不同等级出行距离下各出行方式分担率的均衡分布。

2 模型构建

NL 模型又被称为嵌套 Logit 模型,该模型是在多项 Logit 模型的基础上扩展而来的,主要用来解决反应变量的各个类别之间存在的相关性问题。NL 模型在一定程度上克服了多项 Logit 模型的 IIA 特性,即任意两类别的概率之比不会受到其他类别的影响^[12]。因此,NL 模型可用于出行预测等多个备选项间相互影响的离散选择行为。

构建出行方式与出行距离联合选择的 NL 模型,需要解决三个关键问题:①确定模型结构,即如何划分出行方式与出行距离的层次关系;②确立效用变量函数,即选择解释变量并确定函数形式;③推导选择概率,即确定备选方案的选择概率函数。

2.1 模型结构

NL 模型中存在分层巢氏结构,具有相似特征的备选项被放入一个巢内。每个巢内的选择肢之间存在相关性,而不同巢的选择肢保持独立。由表 1 可知,节假日期间普通铁路、高速铁路和汽车承担了超过 90%的出行量。既有研究表明,高速公路通行费用增加后,出行方式会优先从汽车转

为普通铁路和高速铁路^[13]。因此,为避免备选方案数量过大,将对普通铁路、高速铁路和汽车 3 种主要出行方式进行建模。假设 3 种出行方式间具

有独立性,同一出行方式的备选项具有相关性,可构建出行方式位于上层、出行距离位于下层的 NL 模型^[14],结构见图 2。

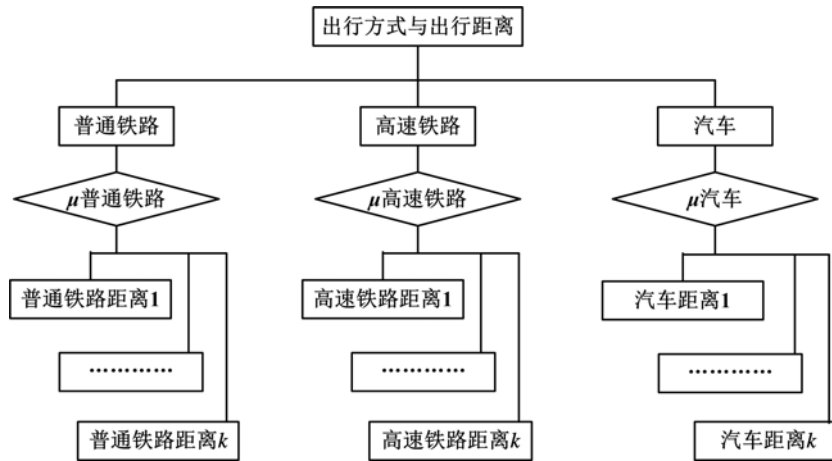


图 2 NL 模型结构

图 2 中,NL 模型共包含 3 个巢,分别代表普通铁路、高速铁路和汽车这 3 种出行方式。每种出行方式对应的子集合包含 k 个选择肢,即 k 个出行距离。NL 模型中选择肢集合为 $C = \{c_i\} (i = 1, 2, 3, \dots, I)$,共包含 $I = 3k$ 个备选方案。 $\mu (0 < \mu < 1)$ 为巢异质参数, μ 值越接近 0 说明巢内选择肢之间相关性越大,反之表示相关性越小。

2.2 效用变量函数

随机效用理论认为备选方案的效用是随机函数,该函数由两部分组成,分别为确定效益和随机项:

$$U_{ni} = V_{ni} + \xi_{ni} \quad (1)$$

式中: U_{ni} 为出行者 n 选择备选方案 i 时的效用; V_{ni} 和 ξ_{ni} 分别为出行者 n 选择方案 i 时的确定效益和随机项。

根据随机效用最大化理论,若存在备选方案 $i (i \in C)$ 的效用为 U_{ni} ,则对任意不同于 i 的方案 j ,当且仅当 $U_{ni} > U_{nj}$,出行者选择备选方案 i 。 V_{ni} 是反映备选方案属性变量和出行者属性的函数。 ξ_{ni} 用来描述出行属性调查过程中无法观测的因素对方案效用的影响。

$$V_{ni} = ASC_i + \sum_{k=1}^{K_i} \beta_{ik} X_{nik} \quad (2)$$

确定效益 V_{ni} 一般可以表示成多个解释变量 X_{nik} 的线性组合,其中 X_{nik} 表示出行者 n 在第 i 个备选方案中第 k 个变量, β_{ik} 是 X_{nik} 的边际效应系数。ASC_{*i*} 是一个特定常数,用于捕捉系统中无法

解释的可变性。通过考虑数据的可获得性并参考既有文献^[15],可确定出行者变量、出行方式相关变量和行程特性变量三类解释变量(表 2),并通过极大似然法估计解释变量的系数。

2.3 选择概率

与多项 Logit 模型等广义极值分布模型一致,NL 模型可获得具有固定形式的选择概率表达式。假设个体 t 的候选方案 $y_t = 1, 2, 3, \dots, m$,在已知选择结果为集合 A_t 中的选择条件下, A_t 中不同选择发生的概率服从标准多项式 Logit 模型,即对 $m \in A_t$ 有:

$$P(y_t = m | y_t \in A_t) = e^{\frac{W_m \beta^m}{\theta_t}} / \sum_{l \in A_t} e^{\frac{W_l \beta^l}{\theta_t}} \quad (3)$$

式中: W_m 是具有 k 个选择肢的集合中相关变量的 k_m 个观测形成的行向量; β^m 是 k_m 维参数向量; θ_t 可看作参数向量 β^m 的尺度参数。经哑变量处理后,假定每个出行备选方案的效用误差均服从二项分布,则根据标准多项式 Logit 模型的选择概率表达式,推导出备选方案 i 的选择概率为^[16]:

$$P(i) = P(k)P(i | k) = \frac{\left(\sum_{j \in C_k} e^{\frac{V_j}{\mu_k}} \right)^{\mu_k}}{\sum_k \left(\sum_{j \in C_k} e^{\frac{V_j}{\mu_k}} \right)^{\mu_k}} \cdot \frac{e^{\frac{V_i}{\mu_k}}}{\sum_{j \in C_k} e^{\frac{V_j}{\mu_k}}} \quad (4)$$

式中: $P(k)$ 为出行者选择出行方式 k 的概率; $P(i | k)$ 为出行者在出行方式为 k 的情况下选择

备选方案 i 的概率,其值受各出行方式效用函数 V 选择肢集合; j 代表该集合内任一可选方案。和巢异质参数 μ 的影响; C_k 为出行方式为 k 时的

表2 解释变量及说明

变量类别	变量名	变量说明
	年龄/岁	<18
		[18,25)
		[25,60)
		≥ 60
出行者变量	家庭人均年可支配收入/元	<40 000
		[40 000,80 000)
		$\geq 80 000$
	是否拥有汽车	哑变量,是为1,否为0
	节假日出行目的	放松休闲 探亲访友 工作出差 哑变量,是为1,否为0
出行方式 相关变量	出行成本	连续变量,小汽车成本为出行距离和油费的乘积,铁路成本为票价
	出行耗时	连续变量,为一次出行所需的时间,与出行方式和出行距离相关
行程特性变量	出行距离/km	<250 [250,500) ≥ 500 哑变量,距离在区间内为1,否则为0

3 模型结果分析

3.1 模型结果

本文以单次出行为分析单元,基于表2描述的各解释变量构建NL模型。利用Python Biogeme平台对模型进行标定,模型生成映射文本及评估结果等文件。为避免出现严重多重共线性造成的模型失真,对经哑变量处理后的解释变量采

取不完全输入方式,定义效用函数并输出估计参数值及 t 检验值,结果见表3。模型拟合优度 ρ^2 反映解释变量对因变量变化的敏感度。实践中拟合优度 ρ^2 的值达到0.4,即可认为模型精度较高^[17]。参数估计结果中拟合优度 ρ^2 为0.397,表明该模型可较好地模拟出行选择。

表3 模型参数估计结果

变量名称	变量说明	参数值	t 检验值	变量名称	变量说明	参数值	t 检验值
年龄1	<18岁	0.611	0.315	出行距离1	<250 km	-0.810	-1.775
年龄3	[25,60)岁	-1.104	-0.393	出行距离2	[250,500) km	-1.186	-5.823
收入2	[40 000,80 000)元	-0.078	-0.153	出行距离3	≥ 500 km	-2.267	-1.703
收入3	$\geq 80 000$ 元	-0.035	-0.014	μ 普通铁路	巢异质参数	0.305	0.343
汽车	是否拥有汽车	-0.776	-0.184	μ 高速铁路	巢异质参数	0.762	6.079
出行目的1	放松休闲	-0.940	-0.486	μ 汽车	巢异质参数	0.583	15.428
出行目的3	工作出差	0.124	0.049	样本数	分析单元数量	635.000	—
出行成本	连续变量	-9.628	-2.354	$LL(\beta)$	对数似然估计	-938.000	—
出行耗时	连续变量	-2.398	-3.018	调整 ρ^2	拟合优度	0.397	—

参数估计结果表明,出行成本和出行耗时参数值均为负,表明单一出行方式被选择的概率与出行成本和出行耗时呈负相关,即出行者更倾向选择出行成本低、出行耗时少的出行方式,符合研究预期。普通铁路、高速铁路和汽车的巢异质参数分别为 0.305、0.762 和 0.583,均显著小于 1。3 种出行方式的巢异质参数表明同一种出行方式在不同出行距离下有较强的相关性。其中,高速铁路的巢异质参数最大,表明随着出行距离的增加,选择该出行方式出行的人数变化最大。

3.2 不同收费下分担率分析

弧弹性法可用于分析相同里程下不同收费标准和同一标准下不同收费里程对出行方式分布的影响。弧弹性指一个变量相对于另一个变量发生一定比例改变的属性,即出行者 n 选择备选方案 i 的概率 $P(i|n)$ 对某一出行属性 x_{in} 的敏感程度。弧弹性 E_{in} 揭示了属性变化过程中保持总收益最大的方法,其原理如式(5)所示:

$$E_{in} = \frac{\Delta P(i|n)}{\Delta x_{in}} \cdot \frac{x_{in}}{P(i|n)} \quad (5)$$

分析节假日期间高速公路免费通行情况,选择小型车 0.45 元/km 为临界值,均匀设置 9 种对比场景。根据出行距离的不同,增加出行成本属性值,不同收费标准下汽车出行成本增幅不同。利用 NL 模型仿真出行者在不同汽车出行成本下各出行方式选择概率 $P(i|n)$ 的变化。结合模型仿真结果计算出行方式分布对不同收费标准的弧弹性变化,分析结果见图 3。其中纵坐标代表不同出行方式的弧弹性,横坐标中每个序号代表一种对比场景,例如序号 1 表示收费标准为 0.05 元/km。

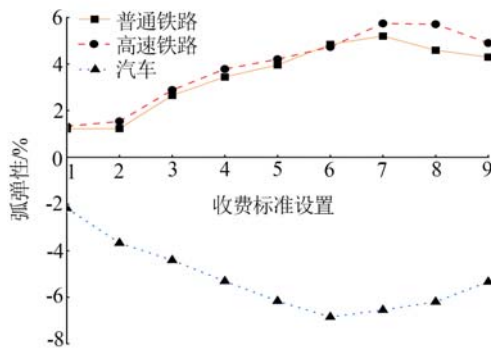


图 3 收费标准弧弹性分析

此外,以所有里程收费标准都是 0.45 元/km 为参考对象,设置不同区间的出行里程收费为对比场景。参考表 1 中出行属性特征,以 100 km 为区

间长度,共设置 6 种对比场景。通过 NL 模型仿真计算出行方式分布对不同收费里程的弧弹性变化,结果见图 4。同理,图 4 中横坐标中每个序号代表一种对比场景。序号 1 表示收费里程为 0~100 km,序号 6 表示收费里程为 500 km 以上(含 500 km)。

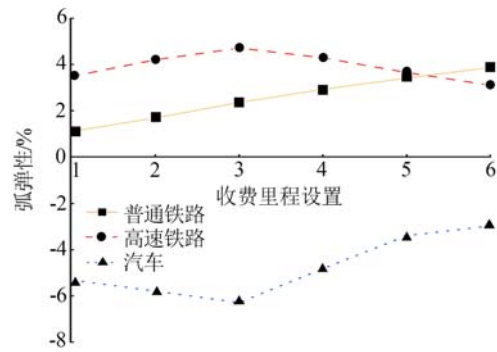


图 4 收费里程弧弹性分析

由图 3 和图 4 可知,随着收费标准的提高,汽车出行成本升高,选择汽车出行的概率降低,弧弹性为负。原计划选择汽车出行的出行量转移至普通铁路和高速铁路,导致选择概率增加,弧弹性为正。收费标准对出行方式影响的显著性呈现先升后降的趋势,当收费标准为 0.30~0.40 元/km 时,影响最为显著。出行方式变化对收费里程的敏感度差异也较大。当高速公路在 300 km 以内进行收费时,不同出行方式间的交通量转移最为显著,此时出行者更倾向于选择高速铁路代替汽车出行。随着收费里程的增大,普通铁路乘客人数增加趋势明显,高速铁路乘客人数增加趋于平缓。综上所述,增加收费里程并提高收费标准,有利于提高公共交通的分担率,减少高速公路交通拥堵现象。

4 分里程收费仿真评价

4.1 场景设计

结合上述步骤对出行方式选择模型构建及弧弹性分析可知,节假日期间高速公路收费里程为 300 km,且收费标准为 0.30~0.40 元/km 时出行方式改变更加显著。为进一步确定不同收费组合对出行方式选择的影响,通过场景仿真法构建多组收费里程和收费标准组合场景。收费里程分为 3 个等级 (<150 km、[150,300) km、≥300 km); 收费标准有 3 种形式(0.30 元/km、0.35 元/km、0.40 元/km)。选取不同距离的收费里程为横坐

标,不同场景类别为纵坐标。以既有节假日免费政策为参考场景,对各等级距离下的出行,采取4

种不同的收费标准设计64种节假日分里程收费场景,见图5。

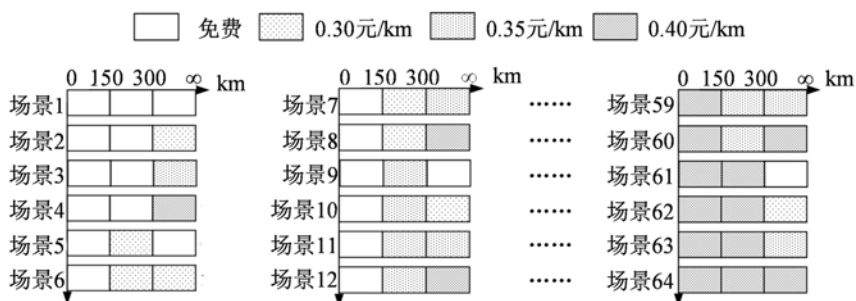


图5 分里程收费场景设计

4.2 仿真评价

将64种分里程收费场景导入已建成的NL模型,根据不同的收费标准组合调整汽车出行成本属性值,铁路出行成本属性值不变。读取汽车出行距离并计算不同场景下收取费用,则出行成本属性值为油费和收取费用之和。依次调整各场景出行成本属性值后进行仿真,导出不同出行方式选择人数和比例。以节假日免费政策下出行方式选择为参考系,统计相对于场景1的出行方式变化率,结果见图6。

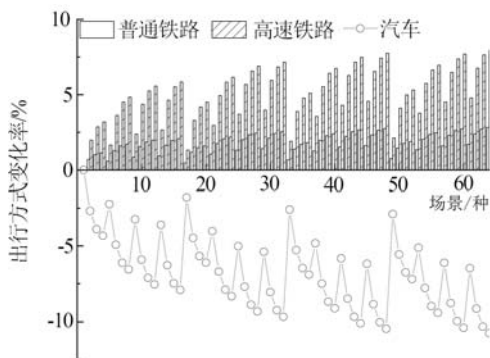


图6 出行方式变化率

由图6可知,与既有政策相比,短距离下对汽车出行进行收费会诱导出行者选择速度更快的高速铁路。随着出行距离的增加,出行者逐渐倾向于出行成本较小的普通铁路。相比于参考场景,提高收费标准使交通需求从汽车转为普通铁路和高速铁路,可以有效缓解节假日期间高速公路的交通拥堵。此外,出行方式对是否收费的敏感度较高,而对收费幅度变化的敏感度较低,且高速铁路对收费幅度变化的敏感

度高于普通铁路。因此,为尽量减少出行成本,防止高速铁路压力过大,可对长距离出行收取小于0.45元/km的费用。

5 结论

掌握出行方式和出行距离的联合选择特性是制定合理的节假日通行政策和方便出行的重要前提。通过构建以出行方式为上层,出行距离为下层的NL模型,结合五一节假日期间出行选择调研数据对出行方式分担率进行分析,并利用场景仿真法考察不同收费组合的影响,得到以下结论:

(1) NL模型参数估计结果表明,普通铁路、高速铁路和高速公路在不同出行距离下均具有较强的相关性,表明不同节假日出行政策下3种出行方式可替代性较高。此外,相较于出行者个人变量,出行方式相关变量(出行成本、出行耗时)对出行方式选择的影响较大。

(2) 不同收费标准的分担率分析结果表明,提高收费标准和对不同出行距离进行分里程收费均能显著降低汽车出行的分担率,提高普通铁路和高速铁路的出行比例。随着收费标准和收费里程的变化,各出行方式的弧弹性会出现较大差异。

(3) 不同收费组合的场景仿真结果表明,对长距离出行收费更容易诱导出行者选择普通铁路,从而缓解节假日高速公路拥堵,同时避免高速铁路购票难的情况。

本文出行选择模型基于邻近效应明显的五一节假日出行需求,未考虑节假日城际交通特征的变化,具有一定的局限性。后续研究将考虑出行时间和季节等因素对城际出行的影响,进一步完善节假日免费政策。

参考文献:

- [1] 马健,肖润谋,王博慧. 高速公路乘用车出行空间分布及行程特征研究[J]. 大连交通大学学报, 2020, 41(5):14-19.
- [2] 王征. 多维空间 BP 神经网络的节假日高速公路网节点拥堵预测分析[J]. 公路, 2016, 61(4):162-169.
- [3] ALTURKI M, RATROUT N T, RAHMAN S M, et al. Impacts of autonomous vehicles on traffic flow characteristics under mixed traffic environment: future perspectives[J]. Sustainability, 2021, 13(19):11052-11052.
- [4] 桑美英. 高速公路货车收费标准改革实施效果评估研究[J]. 价格理论与实践, 2021(10):45-48.
- [5] 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.
- [6] 刘伟铭,陈纲梅. 基于阶梯函数的节假日高速公路拥堵收费和过渡收费模型[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(5):1912-1920.
- [7] 栾鑫,邓卫,程琳,等. 特大城市居民出行方式选择行为的混合 Logit 模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(4):1029-1036.
- [8] HOSSAIN S, HASNINE M S, HABIB K H. A latent class joint mode and departure time choice model for the greater toronto and hamilton area[J]. Transportation, 2021, 48(3):1217-1239.
- [9] ZHU Z, CHEN X Q, XIONG C F, et al. A mixed bayesian network for two-dimensional decision modeling of departure time and mode choice[J]. Transportation, 2018, 45(5):1499-1522.
- [10] 王博慧. 节假日高速公路乘用车出行特征研究[D]. 西安:长安大学, 2020.
- [11] 李涛,王姣娥,高兴川. 中国居民工作日与节假日的城际出行网络异同性研究[J]. 地理学报, 2020, 75(4):833-848.
- [12] 李磊,张曙阳,李彤. 基于嵌套 Logit 模型的竞争性选址问题研究[J]. 系统工程学报, 2021, 36(4):524-538.
- [13] LIN X M, SUSILO Y, SHAO C, et al. The implication of road toll discount for mode choice: intercity travel during the Chinese Spring Festival holiday[J]. Sustainability, 2018, 10(8):2700-2700.
- [14] 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.
- [15] JARAMILLO J P, ARENAS A. Assessing the performance of gradient-boosting models for predicting the travel mode choice using household survey data[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2022, 148(2):1-12.
- [16] 刘诗序,池其源,阎昊,等. 基于分层 Logit 的多方式随机用户均衡分配模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(5):114-122.
- [17] 马书红,付建川,姚志刚. 基于家庭属性和 Nested Logit 模型的学生出行选择特性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(4):122-127.

Research on Travel Mode Choice Model for Major HolidaysHE Yongming¹, ZHANG Lei¹, WEI Kun², CAO Jian¹, WANG Jinyang¹

(1. School of Traffic and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Key Laboratory of Road Structure and Material Transportation Industry, Chang'an University, Xi'an 710000, China)

Abstract: To optimize the holiday free policy on expressways, the traveler variables, traffic mode-related variables and travel characteristic variables are selected as utility variables. The NL model is built with travel mode in upper layer and travel distance in lower layer. The behavior characteristics of travelers under different charge standards and distance are analyzed by arc elasticity, and the influence of various charge combinations on residents travel modes is evaluated by scene simulation. Comparing the change rate of travel modes in different scenarios, the proportion of car will be reduced by increasing charge standards, and the main transfer traffic will be allocated to high-speed train. Trains with less travel costs are more likely to be chosen by travelers as charge standards are increased. The results indicate that public transportation ridership is increased, and traffic congestion of expressway during holidays can be reduced by charging for long-distance travel.

Keywords: holiday traffic; free policy; Nested Logit model; travel mode; scene simulation