

陈波,赵春剑. 运输能力约束条件下的旅客出行选择 Logit 模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(2): 115-122.

CHEN Bo, ZHAO Chun-jian. Logit model for travel mode choice with traffic capacity constraints[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(2): 115-122.

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2024.02.011

# 运输能力约束条件下的旅客出行选择 Logit 模型

陈波, 赵春剑

(长安大学 运输工程学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 为了提升旅客运输通道交通需求预测的准确性, 针对现有旅客出行选择模型未充分考虑交通方式运输能力约束的不足, 在深入分析旅客出行选择机理和运输能力约束机制的基础上, 通过经典多项 Logit (MNL) 模型效用函数的优化设计, 引入惩罚因子表征运输能力对旅客出行选择的约束, 建立运输能力约束条件下的旅客出行选择 Logit 模型 (约束 MNL 模型), 并设计模型求解算法预测各交通方式的分担率。以西宝 (西安—宝鸡) 客运通道为对象进行实例分析, 通过 2 种 MNL 模型预测结果的对比分析, 验证约束 MNL 模型预测性能的优越性。研究表明: 在旅客出行选择过程中, 交通方式运输能力的约束具有普遍性, 是有效交通需求预测不可忽略的重要因素, 约束 MNL 模型考虑了运输能力对旅客出行选择的影响, 更符合旅客出行选择的决策过程, 从机理上为提升交通需求预测的准确性提供了可靠保障; 惩罚因子反映了运输能力约束对旅客出行选择的影响, 代表了运输能力约束条件下运输服务质量的下降和旅客出行效用的损失; 通过惩罚因子的合理赋值, 建立旅客出行选择概率重新分配机制, 能有效模拟旅客出行方式的转换、控制旅客出行选择的概率; 与传统 MNL 模型相比, 约束 MNL 模型表现出了更优异的预测性能, 能始终将预测结果控制在由运输能力决定的分担率上限范围内, 预测结果符合实际、科学有效, 能够为旅客运输通道的网络布局优化、运输组织设计等提供可靠数据支持。

**关键词:** 交通工程; 运输通道; Logit 模型; 运输能力; 惩罚因子

**中图分类号:** U491.14

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-8879(2024)02-0115-08

## Logit model for travel mode choice with traffic capacity constraints

CHEN Bo, ZHAO Chun-jian

(College of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of traffic demand forecasting for passenger transport corridors, addressing the shortcoming that the traffic capacity constraints are not adequately considered in the traditional passengers' mode choice models, the mechanism of passengers' mode choice and constraints from traffic capacity were deeply analyzed, and a penalty factor was introduced through the utility function optimization of the classical MNL model, to characterize the constraints of traffic capacity on passengers' mode choice, a constrained MNL model was

**收稿日期:** 2023-09-29

**基金项目:** 教育部人文社会科学基金项目 (20YJC790007); 陕西省社会科学基金项目 (2019D013);

中央高校基本科研业务费专项资金项目 (300102341677); 陕西省自然科学基金项目 (2022JM-426)

**作者简介:** 陈波 (1988-), 男, 陕西安康人, 讲师, 工学博士, E-mail: chb@chd.edu.cn.

proposed, and the corresponding algorithm was designed to forecast the share of each transportation mode. The XiBao (Xi'an to Baoji) passenger corridor was taken as an example to verify the superior performance of the constrained MNL model by comparative analyzing the forecasting results of the two models. The results show that in the process of passengers' mode choice, the constraints of traffic capacity are universal, which is an important factor that cannot be ignored for effective traffic demand forecasting, the constrained MNL model takes into account the impact of traffic capacity on passengers' mode choice, which is more in line with the decision-making process of passengers' mode choice, and provides a reliable guarantee for improving the accuracy of traffic demand forecasting from the mechanism. The penalty factor reflects the impact of traffic capacity constraints on passengers' mode choice, and represents the decline in transportation service quality and the loss of passengers' utility. Through the reasonable assignment of the penalty factor, it can redistribute the passengers' choice probability, effectively simulate the shift of passengers' mode choice and control the probability of passengers' mode choice. Compare with the traditional MNL model, the constrained MNL model shows better performance, which can always control the forecasting results within the upper limit of the share determined by the traffic capacity, and the results are realistic, scientific and effective, which can provide reliable data support for the optimization of the network layout and the design of the transportation organization. 2 tabs, 6 figs, 30 refs.

**Key words:** traffic engineering; transportation corridor; Logit model; traffic capacity; penalty factor

## 0 引言

交通需求预测是交通运输规划与管理的前提和基础,其准确性对提升交通资源配置效率和综合运输服务质量具有重要意义<sup>[1]</sup>。在旅客运输市场,主要从出行选择行为出发,利用离散选择模型、大数据等手段,分析各交通方式的需求规模。其中,离散选择模型基于旅客的价值观、知识习惯、客观情景等因素构建效用函数<sup>[2-4]</sup>,根据随机效用理论研究旅客出行选择行为,目前已形成以多项 Logit(MNL)<sup>[5-6]</sup>、嵌套 Logit(NL)<sup>[7-8]</sup>、混合 Logit(MXL)<sup>[9-10]</sup>和 Probit<sup>[11]</sup>为代表的较为完整的模型体系,由于模型具有表达直观、方便灵活、求解快速等特点,广泛应用于长距离出行、城市交通<sup>[12-13]</sup>等领域的交通需求预测。近年来,随着大数据分析技术的突飞猛进,利用卫星定位导航、手机信令、票务支付以及交通网络、居住地、工作地等多源数据<sup>[14-18]</sup>,采用决策树、支持向量机、随机森林、人工神经网络等方法构建交通方式选择模型<sup>[19-20]</sup>,通过轨迹、速度、时间等参数标定和模式比对,分析旅客出行选择行为也逐渐成为一种趋势。

随着决策精细化水平的不断提升,对交通需求预测精度的要求也越来越高,旅客出行选择模型也

随之逐步完善和升级,如潜在类别嵌套 Logit、潜在类别混合 Logit、混合多项 Probit 等<sup>[21-22]</sup>,对有关因素或变量的分析越来越全面、深入,并为交通运输工程实践活动提供了基本的数据支持。然而,由于在预测过程中未充分考虑资源、环境等约束因素对旅客出行选择的影响,导致模型预测结果存在出现严重偏差的风险,难以有力支撑行业领域的高效、精准决策。大数据分析亦如此,所依托数据是旅客出行选择结果的体现,难以判断旅客出行选择过程是否受到约束,更无从探查旅客出行选择的初始意愿。

实际上,旅客出行选择除受到票价、时间等因素影响外,还会受到交通方式运输能力等因素的约束,如出行高峰时段的抢票现象。对于某种交通方式而言,由于运输能力的限制,当旅客数量接近或超过运输能力时,乘坐环境的安全性和舒适性将显著下降,甚至影响正常的运输组织,从而导致一些旅客选择其他替代交通方式<sup>[23]</sup>。并且,由于线路、场站、运载工具等资源的限制,任何交通方式的运输能力都是有限的,一般低于高峰时段的需求规模,这表明运输能力对旅客出行选择的约束具有普遍性。在预测交通需求时,如果不充分考虑运输能力对旅客出行选择的约束,极可能导致预测结果出现超过运输能力

或低于实际分担的严重偏差,为交通网络布局、运输组织设计等提供低效甚至无效的参考,不利于交通资源配置效率和综合运输服务质量的有效提升,当前中国交通运输业存在的结构性矛盾与此不无关联<sup>[24-25]</sup>。因此,运输能力约束对交通需求预测至关重要,是有效交通需求预测不可忽视的重要因素<sup>[26]</sup>。

当前,中国正奋力加快建设交通强国,通过供给侧结构性改革和需求侧综合化管理,实现交通供需均衡发展、交通方式协调发展,不断提升运输供给的有效水平,实现更高水平的供需平衡,形成“人悦于行、货优其流”<sup>[27-28]</sup>,准确把握运输需求的规律是这一进程的基础和关键。为进一步提升旅客出行需求分析的准确性,本文将交通方式运输能力作为旅客出行选择的约束条件,深入分析其对旅客出行选择的影响机制,在经典 MNL 模型的基础上,引入惩罚因子表征效用函数,构建考虑运输能力约束的出行选择模型,并设计模型求解算法预测各交通方式的分担。由于考虑了交通方式运输能力有限性对旅客出行选择的约束,研究成果更符合旅客出行选择的客观实际,有利于提升交通需求预测的准确性,从而为交通基础设施布局规划、交通线网扩容改造、运输组织优化设计等提供更可靠的数据支持,促进相关决策和方案稳步提升,推动交通资源配置效率、综合运输服务质量的持续优化。

## 1 模型建立与求解

### 1.1 惩罚因子与模型

由于线路、场站等基础设施的限制,任何交通方式的运输能力都是有限的,当旅客数量达到运输能力之后,随着旅客数量的进一步增加,乘坐环境的安全性和舒适性将大打折扣,相应的运输服务质量也将急剧下降,甚至影响运输服务的正常提供。此时,部分旅客将选择其他方式作为替代或取消出行,直至该方式的运输服务质量恢复正常,并最终实现所有方式的正常运转,共同为旅客出行提供高质量的运输服务。

为分析运输能力约束对旅客出行选择的影响,本文选择经典 MNL 模型作为基础,构建运输能力约束条件下的旅客出行选择模型。根据经典 MNL 模型,设交通方式选择集为  $C$ ,旅客选择交通方式  $i$  出行的效用由固定项  $V_i$  和随机项  $\epsilon_i$  构成。假设  $\epsilon_i$  服从二重指数分布,且各变量相互独立,旅客选择交通方式  $i$  的概率  $P_i$  为

$$P_i = \frac{\exp(\theta V_i)}{\sum_{i \in C} \exp(\theta V_i)} \quad (1)$$

式中: $\theta$  为效用感知系数,反映旅客对  $V_i$  的感知程度,取值为正, $\theta$  越大,表明旅客越了解出行效用,且对其变动的反应越敏感。

固定项  $V_i$  通常表达为收入水平、出行时间等旅客或交通方式固有属性的线性函数。本文参考前期研究成果<sup>[29]</sup>,用客票费用和出行时间测度  $V_i$  表示,即

$$V_i = -(f_i + \beta t_i) \quad (2)$$

式中: $f_i$  为交通方式  $i$  的客票费用; $t_i$  为交通方式  $i$  的出行时间; $\beta$  为旅客时间价值系数。

由于  $f_i$  和  $t_i$  通常被赋予固定值,且与乘坐环境的安全性和舒适性无关,显然无法反映运输能力约束条件下旅客数量增加对运输服务质量的影响,更无法实现旅客向其他替代方式的转换。

受经典 MNL 模型的启示,给定效用感知系数  $\theta$ 、总出行需求  $Q$ ,旅客选择概率和数量取决于  $V_i$ 。 $V_i$  越大,旅客选择该方式的概率越大、数量越多。即可通过改变旅客出行效用的方式控制旅客出行选择。因此,本文考虑在  $V_i$  的表达式中增加调节项,用以调节不同情境下的旅客出行效用,控制旅客选择的概率和数量。其工作原理是:当旅客数量超过运输能力时,激活该调节项,降低旅客选择该方式的效用,减少旅客选择;否则,冻结该调节项,维持由式(2)表达的效用不变。调节项的取值反映了乘坐环境安全性和舒适性的变化,代表了运输服务质量下降造成的效用损失,相当于运输能力约束对旅客出行效用的惩罚,本文称之为惩罚因子  $l_i$ 。 $l_i$  反映了运输服务质量的变化,重要程度等同于客票费用和出行时间,且与之没有直接的关联性。可由  $V_i$  与  $l_i$  的线性组合构建新的效用函数  $V'_i$

$$V'_i = V_i + l_i = l_i - (f_i + \beta t_i) \quad (3)$$

运输能力约束条件下的旅客出行选择模型为

$$P_i = \frac{\exp(\theta V'_i)}{\sum_{i \in C} \exp(\theta V'_i)} = \frac{\exp[\theta(V_i + l_i)]}{\sum_{i \in C} \exp[\theta(V_i + l_i)]} = \frac{\exp[\theta(l_i - (f_i + \beta t_i))]}{\sum_{i \in C} \exp[\theta(l_i - (f_i + \beta t_i))]} \quad (4)$$

设运输能力约束条件下交通方式  $i$  的分担率上限为  $r_i$ ,即交通方式  $i$  的运输能力  $A_i$  与总出行需求  $Q$  之比。当  $P_i > r_i$  时,运输服务质量下降,旅客选择减少, $l_i$  能实现降低  $P_i$  的目标,取值小于 0;当  $P_i \leq r_i$  时,运输服务质量不变,旅客选择不变,无需

降低  $P_i, l_i$  取值为 0。

上述旅客出行选择模型引入惩罚因子表征效用函数,能够减少运输能力约束条件下选择某方式的效用,降低旅客选择该方式的概率和数量,解决经典 MNL 模型方式分担预测超出运输能力的问题,从而提升交通需求分析的准确性。同时,运输能力约束条件下,惩罚因子  $l_i$  绝对值随  $P_i - r_i$  的增大而增大,反映了运输服务质量随旅客选择增多而下降的过程,符合客观规律和实际,表明了引入惩罚因子的科学性。

## 1.2 模型求解算法

模型求解过程的实质就是给惩罚因子赋予合适数值,降低受运输能力约束交通方式选择概率的过程。假定式(1)所示经典 Logit 模型计算得到各方式的选择概率为  $P_i$ ,根据  $P_i - r_i$  的大小将交通方式分为 2 类:一类为选择概率高于分担率上限,记为  $E$ ,即  $\forall p \in E, P_p - r_p > 0$ ;另一类为选择概率不高于分担率上限,记为  $N = C - E$ ,即  $\forall q \in N, P_q - r_q \leq 0$ 。

由前述分析可知,需对  $E$  类交通方式增加惩罚因子,使所有方式的选择概率重新分配。增加惩罚因子后,选择  $E$  类交通方式  $p$  的效用、概率均减少,分别为  $V'_p = V_p + l_p, P_p = r_p$ ;选择  $N$  类交通方式  $q$  的效用不变仍为  $V_q$ ,概率增加,  $\sum_{q \in N} P_q = 1 - \sum_{p \in E} P_p = 1 - \sum_{p \in E} r_p$ 。

由经典 Logit 模型,可知

$$P_p = \frac{\exp[\theta(V_p + l_p)]}{\sum_{p \in E} \exp[\theta(V_p + l_p)] + \sum_{q \in N} \exp(\theta V_q)} = r_p \quad (5)$$

$$\sum_{q \in N} P_q = \sum_{q \in N} \frac{\exp(\theta V_q)}{\sum_{p \in E} \exp[\theta(V_p + l_p)] + \sum_{q \in N} \exp(\theta V_q)} = \frac{1 - \sum_{p \in E} r_p}{1 - \sum_{p \in E} r_p} \quad (6)$$

式(5)、式(6)作比,可得

$$\frac{\exp[\theta(V_p + l_p)]}{\sum_{q \in N} \exp(\theta V_q)} = \frac{r_p}{1 - \sum_{p \in E} r_p} \quad (7)$$

$$l_p = \frac{1}{\theta} \ln \left[ \sum_{q \in N} \exp(\theta V_q) \frac{r_p}{1 - \sum_{p \in E} r_p} \right] - V_p \quad (8)$$

$E$  类交通方式的选择效用增加惩罚因子后,选择概率下降。同时,  $N$  类交通方式的选择概率将会增大,且可能超出其分担率上限。这意味着,上述确定惩罚因子的过程可能需要进行多次,才能保证所有方式的选择概率不超过相应的分担率上限。因

此,本文采用迭代法求解式(4)所示的约束 MNL 模型,图 1 为算法流程,算法步骤如下:

第 1 步,输入参数。总出行需求  $Q$ 、时间价值系数  $\beta$ 、感知系数  $\theta$ 、各交通方式运输能力  $A_i$ 、客票费用  $f_i$ 、出行时间  $t_i$ 。

第 2 步,基础准备。计算可测效用  $V_i = -(f_i + \beta t_i)$ ,分担率上限  $r_i = A_i / Q$ ,初始化惩罚因子  $l_i = 0$ 。

第 3 步,计算分担率。根据式(4)计算分担率  $P_i$ 。

第 4 步,识别  $E$  类方式。初始化  $E = \emptyset$ ;对于交通方式  $i$ ,如果  $P_i - r_i > 0$ ,令  $E = E \cup \{i\}$ 。

第 5 步,判断  $E$  是否为  $\emptyset$ 。如果  $|E| > 0$ ,转第 6 步;否则,结束算法。

第 6 步,计算惩罚因子。 $\forall p \in E$ ,根据式(8)添加惩罚因子  $l_p$ ,并返回第 3 步。

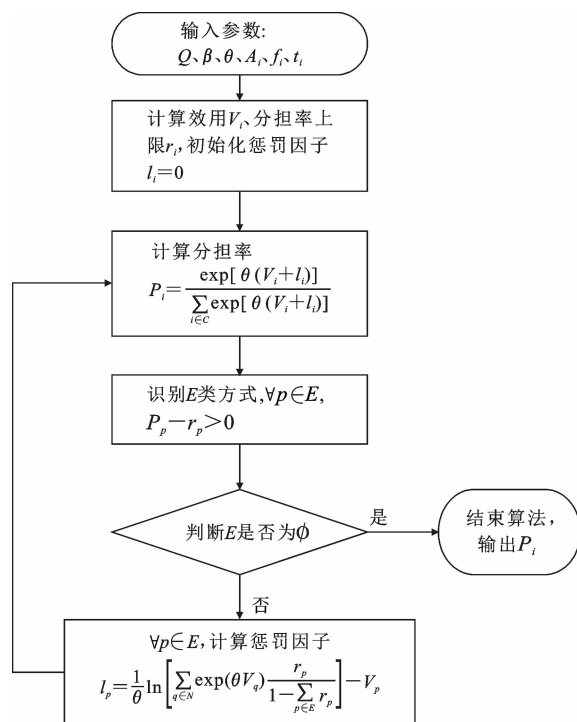


图 1 模型算法流程

Fig. 1 Algorithm flow of model

## 2 实例分析

### 2.1 数据来源

本文以关中城市群最具代表性的西宝(西安—宝鸡)客运通道为例,验证考虑运输能力约束出行选择模型的有效性。该通道内主要有西宝高铁、陇海(兰州—连云港)铁路、西宝高速 G30 以及国道 G108、G310、G344 等交通线路,如图 2 所示。

参考文献[30],并查阅中国铁路 12306 网站资

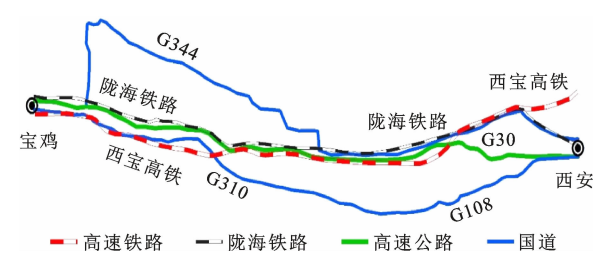


图 2 西宝通道交通方式结构

Fig.2 Transportation modes in Xi'an-Baoji Corridor

料,得到西宝通道各交通方式的主要参数如表 1 所示。其中,国道设计通行能力为 G108、G310 与 G344 通行能力之和;由于陇海铁路、西宝高速和国道除承担旅客运输任务之外,还承担大量货物运输任务,面向旅客运输的设计通行能力占比分别为 38%、32% 和 45%,客运通行能力分别为 60 列、10 960 pcu 和 8 100 pcu。依标准换算后,各方式的旅客运输能力分别为 186 000、72 000、102 400、20 250 人/d。

表 1 西宝通道交通方式参数

项目	西宝高铁	陇海铁路	西宝高速	国道
客票费用/元	51.5	28.5	56.5	45.5
出行时间/h	0.83	2.00	2.00	4.00
设计通行能力	310 列·d <sup>-1</sup>	157 列·d <sup>-1</sup>	128 000 pcu·d <sup>-1</sup>	18 000 pcu·d <sup>-1</sup>
客运通行占比/%	100	38	32	45
客运通行能力	310 列·d <sup>-1</sup>	60 列·d <sup>-1</sup>	40 960 pcu·d <sup>-1</sup>	8 100 pcu·d <sup>-1</sup>
换算标准/人	600	1 200	2.5	2.5
旅客运输能力/(人·d <sup>-1</sup> )	186 000	72 000	102 400	20 250

注:客票费用为西安—宝鸡往返交通每张车票的票面价格;出行时间为西安—宝鸡往返交通单趟次运行时长;西宝高铁参考 CR300AF(4M4T)车型,换算标准取为 600 人/列;陇海铁路参考 25T(车厢编组按 1 软卧、8 硬卧、8 硬座和 1 餐车配置)车型,换算标准取为 1 200 人/列;西宝高速和国道均参考 5 座小客车,换算标准取其座位数的 50%,即 2.5 人/pcu。

西宝通道 2020 年预测客运量为 296 219 人/d。根据旅客运输能力与客运量之比,计算得到西宝高铁、陇海铁路、西宝高速、国道在运输能力约束条件下的分担率上限分别为 62.79%、24.31%、34.57%、6.84%。

2.2 旅客出行选择预测

给定时间价值系数  $\beta=50$ ,感知系数  $\theta=0.01$ 。分别利用式(1)经典 MNL 模型和式(4)约束 MNL 模型求解分担率,结果如表 2 所示。

可见,经典 MNL 预测的分担率可能超出分担率上限,意味着选择该方式的需求将无法全部得到

表 2 两种模型交通方式分担率

Tab.2 Mode share rates of two MNL models

项目	西宝高铁	陇海铁路	西宝高速	国道
分担率上限/%	62.79	24.31	34.57	6.84
经典 MNL 分担率/%	39.94	29.59	21.60	8.87
约束 MNL	分担率/%	44.69	24.31	24.16
	惩罚因子	0.00	30.91	0.00

满足,必将有部分需求转向其他替代方式。在规划交通线路、组织运力投放时,如果不能充分考虑这部分需求,极可能导致对需求市场的误判,从而使得交通资源配置效率、综合运输服务质量难以得到有效提升。在约束 MNL 模型中,通过引入合理赋值的惩罚因子,使上述问题得到很好地解决。分别对陇海铁路、国道赋予 30.91、37.26 的惩罚因子,使其分担率下降至分担率上限,其他方式的分担率相应增大,从而保证所有交通方式的分担率都不超过上限,使所有需求都能够得到有效满足。在一定程度上,惩罚因子建立了一种机制,模拟了旅客因运输能力约束而转向其他替代方式的过程,使各方式的分担率都不会突破运输能力约束。

3 模型对比分析

为进一步验证约束 MNL 模型的适用性,分别从时间价值系数  $\beta$  和感知系数  $\theta$  的角度,对 2 种模型的分担率预测结果进行比较分析。

首先,固定  $\theta=0.01$ ,使  $\beta$  从 0 增加到 200,分析分担率随  $\beta$  的变动规律,计算结果如图 3、图 4 所示。由图 3、图 4 可见,当  $\beta$  较小时,客票费用对旅客出行选择起主要作用,旅客更倾向于选择客票费用相对较低的国道和陇海铁路,随着  $\beta$  逐渐增大,出行时间对旅客出行选择的影响越来越大,旅客越来越倾向于选择出行时间较短的高铁。这种趋势在 2 个模型的预测结果中都有所体现。所不同的是,当  $\beta$  较小或较大时,经典 MNL 模型的预测结果存在超出分担率上限的情况,而约束 MNL 模型的预测结果始终在分担率上限以内。当  $\beta=[100,120]$  时,2 种模型的预测结果基本一致,均未超出分担率上限。

固定  $\beta=50$ ,使  $\theta$  从 0.001 增加到 0.1,分析分担率随  $\theta$  的变动规律,计算结果如图 5、图 6 所示。由图 5、图 6 可知:当  $\theta$  较小时,旅客出行选择受出行效用影响不显著,表现出强随机性。随着  $\theta$  的增大,旅客对出行效用的感知越来越强,效用对旅客出行方式选择的作用越来越大。随着  $\theta$  的不断增

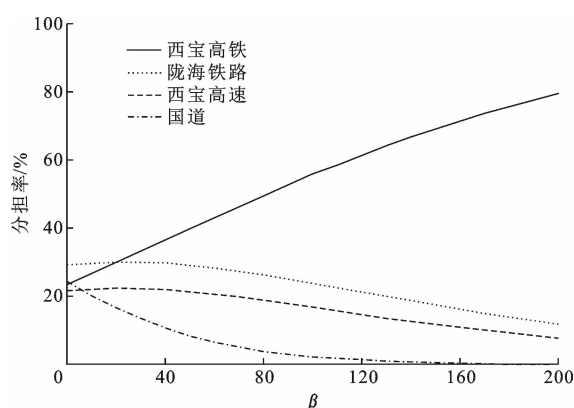
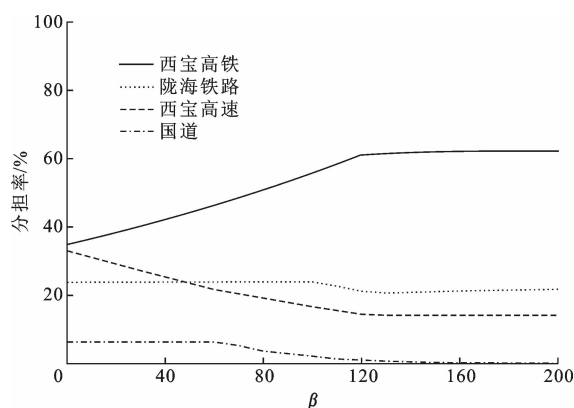
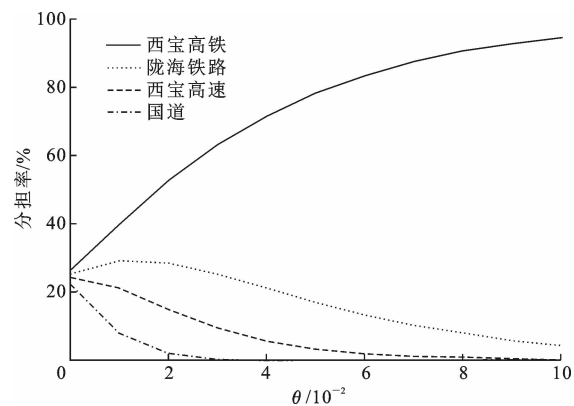
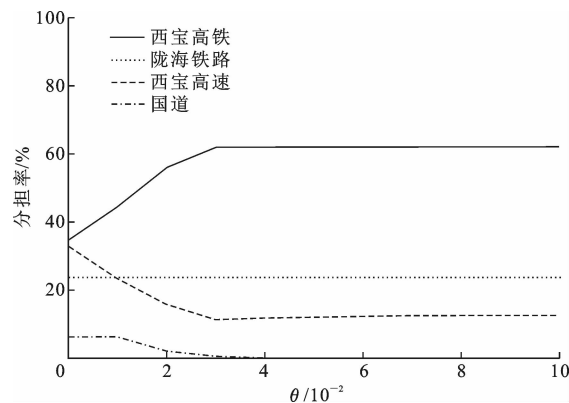
图3 经典 MNL 模型分担率随  $\beta$  变动Fig. 3 Variations of share rates with  $\beta$  for traditional MNL model图4 约束 MNL 模型分担率随  $\beta$  变动Fig. 4 Variations of share rates with  $\beta$  for constrained MNL model图5 经典 MNL 模型分担率随  $\theta$  变动

Fig. 5 Variations of share rates with  $\theta$  for traditional MNL model

大,旅客逐渐倾向于选择出行效用较高的高铁,高铁分担率快速上升,其他出行方式的分担率快速下降。这种分化趋势在经典 MNL 模型中表现得尤为明显,且呈现出快速、持续的特点。而约束 MNL 模型的预测结果在分化到一定程度之后逐渐趋于稳定,高铁的分担率快速上升至上限水平后不再增大,其他出行方式的分担率也始终未超过分担率上限。

图6 约束 MNL 模型分担率随  $\theta$  变动Fig. 6 Variations of share rates with  $\theta$  for constrained MNL model

综合以上分析,约束 MNL 模型的优势得到充分证明。当经典 MNL 模型预测结果未超过分担率上限时,约束 MNL 模型的预测结果与之一致;当经典 MNL 模型的预测结果超过分担率上限时,约束 MNL 模型通过惩罚因子合理赋值,将选择概率重新分配,使所有出行方式的预测结果始终控制在分担率上限范围内。这验证了约束 MNL 模型的科学性和适用性,其预测结果更符合实际,更具实用价值。

## 4 结 语

(1)约束 MNL 模型考虑了运输能力对旅客出行选择的约束,研究成果更符合客观实际,有利于提升交通需求预测的准确性,从而为交通基础设施布局规划、交通线网扩容改造、运输组织优化设计等提供更可靠的数据支持。

(2)引入惩罚因子表达效用函数,通过惩罚因子的合理赋值,建立旅客出行选择概率的重新分配机制,能有效模拟旅客因运输能力约束而转向其他替代交通方式的过程,保证了预测结果的准确性。

(3)在运输能力约束条件下,约束 MNL 模型表现出更优异的预测性能,使预测结果始终保持在分担率上限范围内,有效弥补了经典 MNL 模型的缺陷,证明了约束 MNL 模型的科学性和有效性。

(4)除交通方式运输能力外,还有费用成本等因素也影响着旅客出行选择,各因素对旅客出行选择的影响机理不尽相同,深入分析这些因素对旅客出行选择的影响,有助于更准确把握旅客出行选择的规律,进一步提升交通需求预测的准确性。

## 参考文献:

## References:

- [1] CIPRIANI E, GEMMA A, MANNINI L, et al. Traffic demand estimation using path information from Bluetooth data[J]. *Transportation Research Part C*, 2021, 133:103443.
- [2] 王 灿, 王 德, 朱 玮, 等. 离散选择模型研究进展[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(10):1275-1287.  
WANG Can, WANG De, ZHU Wei, et al. Research progress of discrete choice models[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(10):1275-1287.
- [3] SIFRINGER B, LURKIN V, ALAHI A. Enhancing discrete choice models with representation learning[J]. *Transportation Research Part B*, 2020, 140:236-261.
- [4] HU H, XU J, SHEN Q, et al. Travel mode choices in small cities of China: A case study of Changting[J]. *Transportation Research Part D*, 2018, 59:361-374.
- [5] 程 谦, 卢万胜, 曲思源, 等. 基于多项 Logit 模型的高速铁路客流分配实证研究[J]. *铁道运输与经济*, 2020, 42(7):60-66.  
CHENG Qian, LU Wan-sheng, QU Si-yuan, et al. An empirical study of passenger flow distribution based on multinomial Logit model[J]. *Railway Transport and Economy*, 2020, 42(7):60-66.
- [6] TANG X Y, WANG D H, SUN Y L, et al. Choice behavior of tourism destination and travel mode: A case study of local residents in Hangzhou, China[J]. *Journal of Transport Geography*, 2020, 89:102895.
- [7] 刘 向, 董德存, 王 宁, 等. 基于 Nested Logit 的电动汽车分时租赁选择行为分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(1):47-55.  
LIU Xiang, DONG De-cun, WANG Ning, et al. Analysis of choices of electric car sharing based on Nested Logit model[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(1):47-55.
- [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 Shu-hong, ZHOU Ye-chao, 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.
- [9] 刘 锴, 王 静, 王江波, 等. 考虑个体偏好异质性的定制公交选择行为[J/OL]. *中国公路学报*: 1-14 [2023-12-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20230907.1145.006.html>.  
LIU Kai, WANG Jing, WANG Jiang-bo, et al. Study on customized bus choice behavior considering individual preference heterogeneity[J/OL]. *China Journal of Highway and Transport*: 1-14 [2023-12-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20230907.1145.006.html>.
- [10] AHMED U, ROORDA M J. Modelling carrier type and vehicle type choice of small and medium size firms[J]. *Transportation Research Part E*, 2022, 160:102655.
- [11] CAN V V. Estimation of travel mode choice for domestic tourists to Nha Trang using the multinomial probit mode[J]. *Transportation Research Part A*, 2013, 49:149-159.
- [12] 于 跃, 李雷鸣. 从出租车到网约车的乘客出行方式选择行为演化博弈分析[J]. *软科学*, 2019, 33(8):126-132.  
YU Yue, LI Lei-ming. Evolutionary game analysis on travel mode selecting behavior of passengers from taxi to ridesharing[J]. *Soft Science*, 2019, 33(8):126-132.
- [13] LARS B, AMEN P V, HELBICH M. Elderly travel frequencies and transport mode choices in Greater Rotterdam, the Netherlands [J]. *Transportation*, 2016, 44:1-22.
- [14] GRAELLS G E, CARO D, PARRA D. Inferring modes of transportation using mobile phone data[J]. *EPJ Data Science*, 2018, 7(1):49.
- [15] WANG Z Z, HE S Y, LEUNG Y. Applying mobile phone data to travel behaviour research: A literature review[J]. *Travel Behaviour and Society*, 2018, 11:141-155.
- [16] 钟舒琦, 邓如丰, 邓红平, 等. 基于兴趣点与导航数据的手机信令数据出行方式识别[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2020, 59(3):87-96.  
ZHONG Shu-qi, DENG Ru-feng, DENG Hong-ping, et al. Recognition of traffic mode of mobile phone data based on the combination of point of interest data and navigation data[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2020, 59(3):87-96.
- [17] 杜亚朋, 雒江涛, 程克非, 等. 基于手机信令和导航数据的出行方式识别方法[J]. *计算机应用研究*, 2018, 35(8):2311-2314.

- DU Ya-peng, LUO Jiang-tao, CHENG Ke-fei, et al. Recognition of urban travel method based on cell phone signaling and navigation map data[J]. *Application Research of Computers*, 2018, 35(8): 2311-2314.
- [18] 宋永朝, 杨 培. 基于多源数据的通勤高峰期出行方式分担率预测方法研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(5): 84-91.
- SONG Yong-chao, YANG Pei. Prediction method of travel mode share rate in commuting peak period based on multi-source data[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2018, 37(5): 84-91.
- [19] MINAL S, RAVI S C, MADHU E. Development of neuro-fuzzy based multimodal mode choice model for commuter in Delhi[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2018, 13(2): 1-9.
- [20] 刘春禹, 罗 霞. 出行方式选择: 机器学习方法与多项 Logit 模型比较研究[J]. *综合运输*, 2018, 40(8): 57-63.
- LIU Chun-yu, LUO Xia. Travel mode choice: A comparison of machine learning and multinomial Logit model[J]. *China Transportation Review*, 2018, 40(8): 57-63.
- [21] GREENE W H, HENSHER D A. Revealing additional dimensions of preference heterogeneity in a latent class mixed multinomial Logit model[J]. *Applied Economics*, 2013, 45(14): 1897-1902.
- [22] BHAT C R, SIDHARTHAN R. A simulation evaluation of the maximum approximate composite marginal likelihood (MACML) estimator for mixed multinomial probit models[J]. *Transportation Research Part B*, 2011, 45(7): 940-953.
- [23] 廖 勇. 运输通道内客运方式的替代性模型研究[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(14): 5969-5974.
- LIAO Yong. Research on the substitutability model between passenger transport modes in transportation corridor[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(14): 5969-5974.
- [24] 周正祥, 毕继芳. 长江中游城市群综合交通运输体系优化研究[J]. *中国软科学*, 2019(8): 66-76.
- ZHOU Zheng-xiang, BI Ji-fang. Study on optimization of comprehensive transportation system of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *China Soft Science*, 2019, 8: 66-76.
- [25] 薛艳杰, 王 振. 长三角城市群协同发展研究[J]. *社会科学*, 2016(5): 50-58.
- XUE Yan-jie, WANG Zhen. Research on the collaborative development of urban agglomeration in Yangtze River Delta[J]. *Journal of Social Sciences*, 2016(5): 50-58.
- [26] RAHMAN M L, BAKER D. Modelling induced mode switch behaviour in Bangladesh: A multinomial logistic regression approach[J]. *Transport Policy*, 2018, 71: 81-91.
- [27] 李连成. 交通强国的内涵及评价指标体系[J]. *北京交通大学学报(社会科学版)*, 2020, 19(2): 12-19.
- LI Lian-cheng. Connotation and evaluation index system for building China's strength in transportation[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition)*, 2020, 19(2): 12-19.
- [28] 孙启鹏, 朱 磊, 陈 波. 基于动态广义费用的客运通道交通方式选择 Logit 模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2013, 13(4): 15-22.
- SUN Qi-peng, ZHU Lei, CHEN Bo. A dynamic generalized cost based Logit model for passenger corridors[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2013, 13(4): 15-22.
- [29] SINGH M, CHEN G W, GOPALAKRISHNAN R, et al. Exploration of the contributing factors to the walking and biking travel frequency using multi-level joint models with endogeneity[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2022, 9(6): 1044-1054.
- [30] 张 陆. 城市群客运交通结构优化配置研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- ZHANG Lu. Study on urban agglomeration of optimal allocation of passenger traffic[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.