

刘钦, 吉小进, 张蓓, 等. 基于分层 Logistic 回归模型的高速公路货车差异化收费策略[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(1): 144-150. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.250122

基于分层 Logistic 回归模型的高速公路货车差异化收费策略

刘钦¹, 吉小进², 张蓓², 李根¹, 韩宝睿¹, 黄海博¹, 尹超英¹, 王方旭¹

(1 南京林业大学汽车与交通工程学院, 南京 210037; 2 北京明树数据科技有限公司, 北京 100102)

摘要: 针对高速公路货车差异化收费, 大多以经济效益为导向, 忽视社会效益及路网整体通行效率的问题。本文以综合效益(经济效益、社会效益)最大化为目标, 构建适用于多地区的含有不同地区路段类别因子的分层 Logistic 回归模型。基于甘肃和新疆差异化收费项目数据对模型进行标定, 假设 3 种收费情景并制定多样化的收费策略, 分析货车行驶不同距离高速公路的分担率变化情况; 针对目标高速公路对费率变化进行敏感性分析。结果表明, 新疆 G0711 和 G0612 高速公路在制定的 3 种差异化收费策略下, 高速公路货车分担率分别提升了 4.99%、14.01%、8.34%。

关键词: 差异化收费策略; 分层 Logistic 回归; 空间异质性; 分担率

中图分类号: U492

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)01-0144-07

Differentiated toll strategy of highway trucks based on hierarchical Logistic regression model

LIU Qin¹, JI Xiaojin², ZHANG Bei², LI Gen¹, HAN Baorui¹, HUANG Haibo¹, YIN Chaoying¹, WANG Fangxu¹

(1 College of Automotive and Traffic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2 Beijing Bridata Technology Co., Ltd., Beijing 100102)

Abstract: Aiming at the problem that the differentiated toll collection of expressway trucks is mostly guided by economic benefits, ignoring social benefits and the overall traffic efficiency of the road network, this paper aims at maximizing the comprehensive benefits (economic benefits, social benefits), and constructs a hierarchical Logistic regression model suitable for multiple regions with different regional road section category factors. Based on the data of differentiated toll projects in Gansu and Xinjiang, the model is calibrated. Three charging scenarios are assumed and diversified charging strategies are formulated to analyze the change of sharing rate of trucks driving different distances from highways. The sensitivity analysis of the target highway to the rate change is carried out. The results show that the sharing rate of expressway trucks under the three differentiated charging strategies of Xinjiang G0711 and G0612 expressways has increased by 4.99%, 14.01% and 8.34% respectively.

Key words: differentiated charging strategy; stratified Logistic regression; spatial heterogeneity; share rate

0 引言

差异化收费是国家深化交通运输领域供给侧结构性改革, 推进物流业降本增效的一项重要政策。现已有部分省份结合其区域经济发展状况及交通流分布特征, 从经济角度出发, 制定了一系列以成本控制为导向的单一高速公路货车收费标准^[1-2]。根据

实施情况来看, 差异化收费能够带来一定程度上的通行减免, 但折扣选取较主观且忽视了路网整体效率、节能减排等社会综合效益, 且一些经济不发达地区高速公路使用频次低下, 收费设置不合理, 难以保障其可持续发展^[3-5]。因此, 本文基于甘肃和新疆差异化收费项目展开研究, 构建含有不同地区路段类别因子的分层 Logistic 回归模型; 提升目标高速公

基金项目: 国家自然科学基金(72204114)。

作者简介: 刘钦(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 交通运输规划理论与方法; 吉小进(1978—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 交通大数据处理; 张蓓(1996—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 交通大数据处理; 李根(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 交通规划; 黄海博(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 交通运输规划理论与方法; 尹超英(1989—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向: 交通与土地利用; 王方旭(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 交通运输规划理论与方法。

通信作者: 韩宝睿(1973—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 城市规划和城市社会问题。Email: hbr@njfu.edu.cn。

收稿日期: 2023-08-05

哈尔滨工业大学主办 ◆ 专题设计与应用

路货车运输的综合效益(经济效益和社会效益);制定多样化的收费策略,分析货车行驶不同距离高速公路的分担率变化情况;并针对目标高速公路对费率变化进行敏感性分析。

目前,针对高速公路差异化收费的研究主要聚焦到 4 个方面:考虑路段拥堵情况、货车行驶距离、驾驶员出行行为和出行成本控制^[6-7]。从交通流角度来看,其研究分别对应于路网交通流的分时段、分路段、分驾驶员特性和交通经济学角度^[8-9]。在路段拥堵情况方面,Figueiras P^[10]考虑分时段差异化收费构建了高峰动态收费模型。王林^[11]根据交通流特征将汉宜高速公路分为 6 段,基于公路运营者和使用者之间的博弈关系,构建了最优费率计算模型。在货车行驶距离方面,Wang^[12]等依据货车司机行驶距离,构建道路货运需求弹性模型来分析费用对货运的影响。在驾驶员出行行为方面,孔德学^[13]通过划分货车司机出行个体的差异性,分析了货车司机在面临不同通行费率时的出行选择行为。在成本控制方面,李明^[14]等以企业收益最大化为目标,基于用户均衡理论和货车出行次数,构建了高速公路货车的差异化收费模型。

综上所述,目前高速公路差异化收费主要以企业经营、政府管理和用户使用 3 个角度进行建模,且模型的建立相对比较成熟和完善,但以路网管理者的角度,从路网整体流量分配来看,相关研究较少,忽视了除经济效益以外的其他效益。目前存在的主要问题是:

- (1)高速公路收费标准的制定大多以成本控制为导向,忽视社会效益及路网整体通行效率。
- (2)现有差异化收费研究主要是从单因素角度分析,缺乏整体分析,对货车运输综合效益(经济、效率、环境、舒适、安全)提升效果不明显。
- (3)对实施复杂收费策略情景下,货车行驶不同距离高速公路的研究较少,致使现有高速公路差异化收费标准制定较主观,缺乏依据^[15]。

1 数据来源和影响机理

1.1 数据来源

本文数据来源为甘肃省 G1816 乌玛高速临夏至合作段、G22 青兰高速雷家角至西峰段、G1816 乌玛高速景泰至中川段、G30 连霍高速山丹西至玉门段;新疆 G0711 高速尉犁至若羌段、G0612 高速若羌至依吞布拉克段,以及对应的平行公路 G568、G309、S101 和 X203、G312、G218、G315 的路段里程数据、

分车型单公里费率数据(不含桥隧)、门架货车收费数据和交通量数据、门架货车车型比例等数据。

1.2 差异化收费对货车出行影响因素及影响机理

高速公路通行费设置的高低,直接影响其整体通行效率。如在西北地区,高额的高速公路通行费用使得大部分货车司机选择对应的平行公路^[16],而使高速公路分担率极低,不仅降低了货车货物运输的效率,同时也使路网交通流量分配极其不均衡,高速公路收益呈负增长^[17]。若从货车司机角度出发,其期望在行程费用、行程时间和行驶感受等方面实现综合效益最大化。因此,平衡高速公路经营企业、路网交通管理者和货车司机三者之间的利益关系成了问题的重中之重^[18]。因此,本文模型建立影响的因素不仅要考虑行驶时间与速度、行车安全与舒适、收费服务等社会效益的提升,也会注重高速公路经营企业的经济效益,避免顾此失彼^[19]。

综上所述,本文对高速公路差异化收费对货车出行的影响因素和影响机理进行总结,如图 1、图 2 所示。

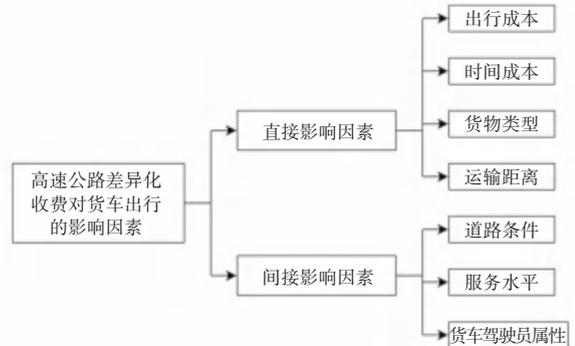


图 1 高速公路差异化收费对货车出行的影响因素

Fig. 1 Influencing factors of expressway differentiated toll on truck travel



图 2 高速公路差异化收费影响机理

Fig. 2 Influence mechanism of highway differentiated toll

2 研究方法

2.1 基于分层 Logistic 回归的高速公路货车分担率模型

由于货车司机在高速公路行驶过程中不能随时掌握路网整体状态,即货车司机是凭自身感知选择路径,符合选择的随机性。而效用函数又会随着货车司机的出行特性和环境条件的不同存在差异性,因此可以构建随机效用函数来反映这种差异性,并通过分层 Logistic 回归模型计算高速公路货车的分担率^[20]。

假设:有 m 个货车司机,出行路径集合为 a_m ,货车司机选择的出行方案 j 所对应的效用值为 u_{jm} ,则该货车司机选择路径 i 出行的关系满足:

$$u_{im} > u_{jm}, i \neq j, j \in a_m \quad (1)$$

其中,对于货车司机选择的出行方案的效用值 u_{jm} ,应包括固定项 v_{im} 和随机概率项 ε_{im} 两项。固定项是可观测的,而随机项是不可观测的。那么货车司机 m 选择某出行路径 i 的效用函数可以表示如下:

$$u_{im} = v_{im} + \varepsilon_{im} \quad (2)$$

根据效用最大化理论可知,货车司机 m 选择路径选择枝 i 出行的概率 P_{im} :

$$P_{im} = \text{Prob}(u_{im} > u_{jm}, i \neq j, j \in a_m) = \text{Prob}(v_{im} + \varepsilon_{im} > v_{jm} + \varepsilon_{jm}; i \neq j, j \in a_m) \quad (3)$$

$$\text{其中, } 0 \leq P_{im} \leq 1, \sum_{i \in a_m} P_{im} = 1.$$

假设上述随机项 $\varepsilon_{jm} (j = 1, 2, \dots, J_m)$ 服从 0 到 1 的 Gumbel 分布,则货车司机选择方案 1 的概率如下:

$$P_{1m} = \text{Prob}(u_{1m} \geq u_{jm}, j = 2, 3, \dots, J_m) = \text{Prob}(v_{1m} + \varepsilon_{1m} \geq v_{jm} + \varepsilon_{jm}, j = 2, 3, \dots, J_m) = \text{Prob}[v_{1m} + \varepsilon_{1m} \geq \max_j(v_{jm} + \varepsilon_{jm})] \quad (4)$$

令 $u_n^* = \max_j(v_{jm} + \varepsilon_{jm})$, 则 P_{1m} 可变形为:

$$P_{1m} = \text{Prob}(v_{1m} + \varepsilon_{1m} \geq v_m^* + \varepsilon_m^*) = \text{Prob}[(v_m^* + \varepsilon_m^*) - (v_{1m} + \varepsilon_{1m}) \leq 0] \quad (5)$$

则基于 Gumbel 分布的 Logistic 分布可得:

$$P_{1m} = \frac{1}{1 + e^{(v_m^* - v_{1m})}} = \frac{e^{v_{1m}}}{e^{v_{1m}} + e^{v_m^*}} = \frac{e^{v_{1m}}}{e^{v_{1m}} + \exp\left[\ln \sum_{j=2}^{J_m} e^{v_{jm}^*}\right]} = \frac{e^{v_{1m}}}{\sum_{j=2}^{J_m} e^{v_{jm}^*}} \quad (6)$$

由于货车司机在高速公路和平行公路之间的选择是一个二元的结果,则货车司机选择高速公路的

概率如下:

$$P_{\text{高速}} = \frac{1}{1 + e^{\Delta v}} = \frac{1}{1 + e^{v_2 - v_1}} \quad (7)$$

货车司机选择高速公路的概率也是高速公路货车的分担率。

2.2 随机效用函数构建

考虑到综合效益,效用函数从通行费用、行程时间费用、油耗费用、出行舒适度和道路安全 5 个角度出发,构建随机效用函数,以效用函数最大化理论计算高速公路货车的分担率。

1) 通行费用

考虑不同路径对不同车型(包括 6 种车型)的收费费率 and 路径的行程距离,则通行费用计算如下:

$$A_{ij} = \lambda_{ij} \cdot f_i \cdot l_i \quad (8)$$

其中, A_{ij} 为第 i 条出行路径 j 型车的道路通行费用; λ_{ij} 为不同车型间的收费级差系数; f_i 为第 i 条收费路径的收费费率(元/车公里); l_i 为表示第 i 条收费公路的里程(公里)。

2) 行程时间费用

考虑高速公路所在区域经济生产水平、货车司机行驶时长和路径通行能力,计算货车司机的行程时间费用如下:

$$B_{ij} = t_{ij}(0) [1 + 0.15(Q/C_i)^4] \times (GDP/(t_w \times d)) \quad (9)$$

其中, B_{ij} 为路径 i 上 j 型车出行的行程时间费用; Q 为不同车型在路径 i 年平均日流量; C_i 为第 i 条路径的通行能力; GDP 为路径 i 所在区域内用户的人均生产总值(元/人/a); t_w 为货车司机行驶时长(h); d 为货车司机年均出行天数(d)。

3) 油耗费用

考虑道路条件和柴油价格,不同车型 j 的燃油成本计算如下:

$$C_{ij} = [((\alpha_j v_{ij}^2 + \beta_j v_{ij} + \chi_j) \times \delta \times \eta_1^{v_{ij}} \times \eta_2^\sigma) \times l_i / 100] \times y_l \quad (10)$$

其中, $\alpha_j, \beta_j, \chi_j$ 为车型 j 的模型回归参数; δ, η_1, η_2 为模型回归系数; v_{ij} 为出行路径 i 上车型 j 平均行驶速度(km/h); σ 为出行路径坡度(%); l_i 为出行路径 i 的长度; y_l 为车辆燃油价格(元/L)。

4) 出行舒适度费用

考虑货车司机疲劳恢复时长和行程时间计算舒适性费用值 D_i , 计算如下:

$$D_i = \frac{P}{1 + \mu \cdot e^{-\omega T_i}} \cdot (GDP/(t_w \times d)) \quad (11)$$

其中, P 为疲劳恢复的极限时间(参照资料 $P = 2\text{h}$); $1 + \mu e^{-\omega T_i}$ 为货车司机的疲劳恢复时间; μ 、 ω 为第 i 条出行路径舒适性评价的待定系数(参照资料取值)。

5) 道路安全性费用

考虑道路事故发生率, 计算道路安全性费用:

$$E_i = \frac{1}{1 + 0.045G_i^{0.38}} \quad (12)$$

其中, E_i 为第 i 条出行路径的安全性费用, G_i 为第 i 条出行路径的事故发生率。

综上所述, 效用函数如下:

$$u_{ij} = c + \theta_1 A_{ij} + \theta_2 B_{ij} + \theta_3 C_{ij} + \theta_4 D_{ij} \quad (13)$$

3 案例分析

3.1 模型参数标定

货车司机出行时, 每个货车司机对出行路径的选择可看做相对独立。将 m 个货车司机选择出行路径, 看作 m 次贝努利试验, m 个货车司机选择 n 种出行路径的人数分别是 m_1, m_2, \dots, m_n 的联合概率, 可以表示如下:

$$L = \prod_{i=1}^n f(x_i, \theta) = p(m_1, m_2, \dots, m_n | \theta) = \frac{m!}{m_1! m_2! \dots m_n!} \prod_{i=1}^n p_i^{m_i} \quad (14)$$

其中, m 为货车司机总数; m_i 为选择路径 i 的货车数; P_i 为货车司机对路径 i 的选择概率; θ 为系数向量, $\theta = (\theta_1, \theta_2)$ 。对式(14) 两边取对数, 再分别对 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 和 θ_4 求偏导, 令各偏导数为 0, 即可确定 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 和 θ_4 的值。

应用甘肃省和新疆省高速公路及对应的平行公路数据, 对模型进行标定, 将不同的高速公路分别设定不同的地区类别因子(通过调查可得), 带入模型进行标定, 标定结果如图 3 所示, 其中交叉验证模型结果如图 4 所示, 分担率等值线和拟合曲面如图 5 和图 6 所示。



图 3 不同道路类别模型标定结果

Fig. 3 Calibration results of different road category models



图 4 五折叠交叉验证模型结果

Fig. 4 Five-fold cross-validation model results

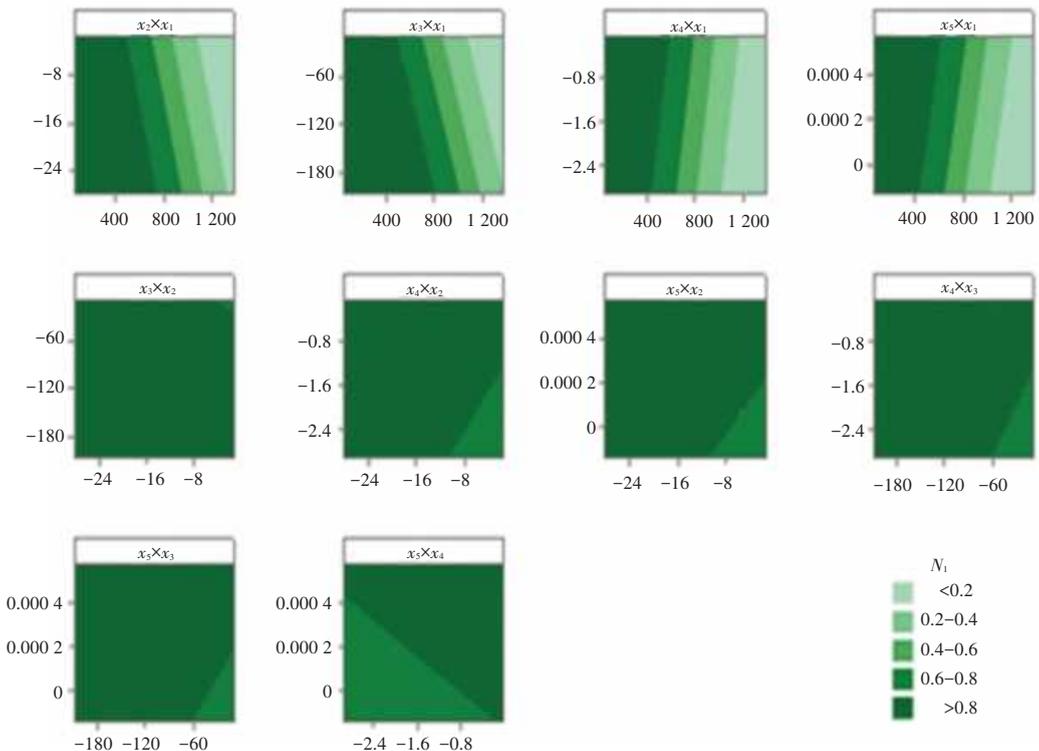


图 5 分担率等值线图

Fig. 5 Share rate contour map

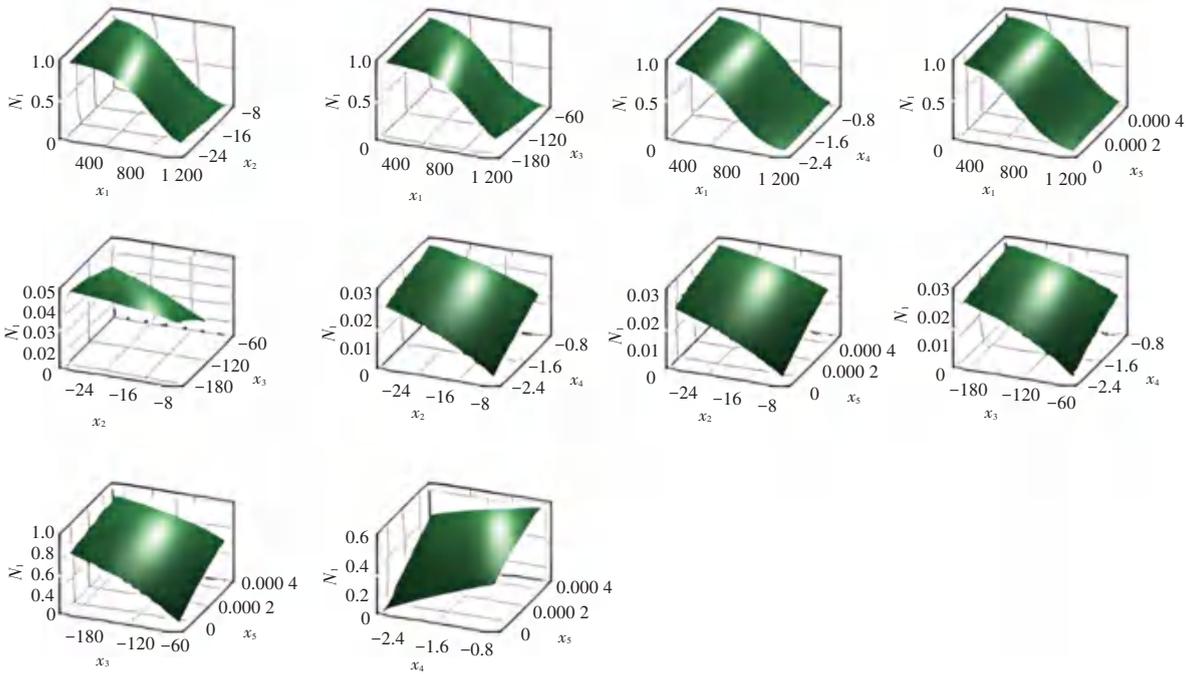


图6 变量-分担率拟合曲面图

Fig. 6 Variable-share rate fitting surface diagram

取图3中前两组数据(同一路段)作为验证,其余数据作为拟合数据,预测效果见表1。

表1 数据拟合验证结果

Table 1 Data fitting verification results

数据	实际分担率	预测分担率	差值
数据1	0.541 2	0.374 5	0.166 7
数据2	0.689 6	0.497 3	0.192 3
分担率提升	27.43%	32.79%	5.36%

对于预测本身的情况,预测分担率与实际分担率的差值分别为0.17和0.19;对应5折交叉验证下,ROC曲线下面积为0.7008,对应于差异化评估效果,预测结果符合预期;对于模型的评估精度,对比分担率提升可知,预测分担率提升与实际分担率提升差值在5.36%,模型拟合精度达到期望。

3.2 货车行驶长短距离高速公路占比与分担率变化研究

以新疆G0711和G0612高速公路为例,实施3种不同的差异化收费策略,进行不同情景下高速公路分担率分析。

情景一(阶梯递远递减收费):

(1) 连续行驶依若、三若、尉三路段438 km, 240 km 7折收费, 240~375 km 6折收费, 375~438 km 5折收费;

(2) 连续行驶依若、三若、尉三路段超过

375 km,全路段5折收费;

(3) 连续行驶依若、三若、尉三路段438 km(与距离无关)统一7折收费。

情景二(递远递减统一折扣收费):

(1) 连续行驶依若和三若路段270 km, 240 km 7折收费, 240~270 km 6折收费;

(2) 连续行驶依若和三若路段超过240 km, 全路段6折收费;

(3) 连续行驶依若和三若路段270 km(与距离无关)统一7折收费。

情景三(全路段统一折扣收费): 分别对各路段分别实施不同的优惠分析分担率变化情况。

通过调整模型的通行费用,得到以下结果如图7、图8所示:

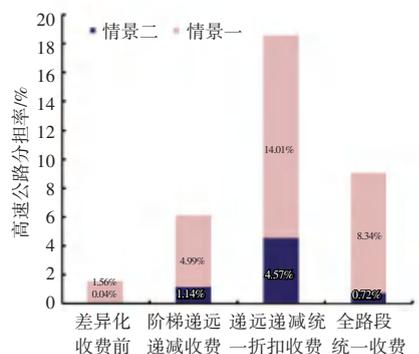


图7 情景一与情景二

Fig. 7 Scenarios 1 and 2

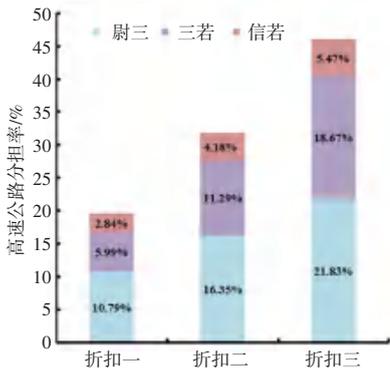


图 8 情景三

Fig. 8 Scenario 3

对于货车行驶长短距离的分析,模型计算步骤同上。长距离行驶会改变道路通行费用和行程时间费用两个效用函数。按照模型拟合的回归方程计算在长距离行驶过程中,采用不同的收费策略,以及各距离路段内高速公路和普通公路的分担流量,得到两种公路的分担率,同时计算得到两种公路分担的货车在自身路段行驶不同里程所占的比例,计算结果见表 2。

表 2 3 种情景下高速公路分担率和路段自身比例

Table 2 Highway share ratio and road section ratio under the three scenarios

阶梯递远递减	a 情景一的高速公路分担率				阶梯递远递减	b 情景一的高速公路路段自身比例 行驶长短距离的各路段自身比例		
	240 km 以内	240~375 km	375 km 以上	总计		240 km 以内	240~375 km	375 km 以上
高速公路	392	107	687	1 186	高速公路	33.03%	9.04%	57.93%
普通公路	208	0	599	808	普通公路	25.80%	0.00%	74.20%
分担率	65.27%	100.00%	53.40%					
通道	600	107	1 286					
阶梯递远递减 统一折扣	c 情景二的高速公路分担率				阶梯递远递减 统一折扣	d 情景二的高速公路路段自身比例 行驶长短距离的各路段自身比例		
	240 km 以内	240~375 km	375 km 以上	总计		240 km 以内	240~375 km	375 km 以上
高速公路	409	107	809	1 324	高速公路	30.86%	8.09%	61.05%
普通公路	191	0	477	669	普通公路	28.61%	0.00%	71.39%
分担率	68.11%	100.00%	62.87%					
通道	600	107	1 286					
全路段统一	e 情景二的高速公路分担率				全路段统一	f 情景二的高速公路路段自身比例 行驶长短距离的各路段自身比例		
	240 km 以内	240~375 km	375 km 以上	总计		240 km 以内	240~375 km	375 km 以上
高速公路	384	107	634	1 125	高速公路	30.86%	8.09%	61.05%
普通公路	216	0	652	868	普通公路	28.61%	0.00%	71.39%
分担率	64.03%	100.00%	49.27%					
通道	600	107	1 286					

3.3 不同收费策略下目标高速公路对费率变化的敏感性分析

以甘肃省 G30 高速公路玉门到黑山湖路段为目标路段,以对路段打 7 折作为基准,以 5% 的费率上下调整高速公路路段优惠力度,分析该路段分担率变化情况。不同优惠力度下,该高速公路路段分担率如图 9 和表 3 所示:

表 3 不同优惠力度下 G30 高速公路玉门到黑山湖路段分担率
Table 3 Sharing rate of Yumen - Heishan Lake section of G30 expressway under different preferential intensities %

优惠力度	90	85	80	75	70
分担率	42.23	45.31	47.91	50.12	52.01
优惠力度	65.00	60.00	55.00	50.00	
分担率	53.65	55.07	56.32	57.43	

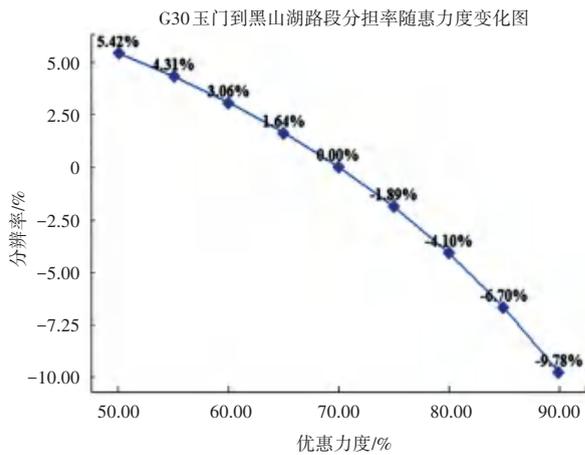


图9 不同折扣下 G30 玉黑路段分担率变化情况

Fig. 9 Change of sharing rate of G30 Yuhei section under different discounts

4 结束语

本文以优化高速公路经营企业、路网交通管理者和货车司机三者的综合效益为目标,构建了考虑地区差异性类别因子的高速公路货车收费模型。并选取甘肃和新疆的真实数据对模型进行标定,模拟不同的收费场景,实现费率的动态调整。最终模型有助于调节路网交通流,能够提高高速公路分担率,并且能够提升货车司机的出行满意度。

参考文献

[1] 王秋林, 楚瑞锋, 李贞贤. 收费标准调整对经营性高速公路收费期限评估的影响[J]. 公路, 2021, 66(4): 208-211.

[2] 韦昌永. 灌风段高速公路差异化收费方案研究及实施效果评估[J]. 交通工程, 2022, 22(4): 85-91.

[3] 孔德学, 敖谷昌, 张惠玲, 等. 差异化收费下货车出行选择偏好分析及建模[J]. 深圳大学学报(理工版), 2023, 40(2): 210-217.

[4] 吴建清, 霍延强, 王建柱, 等. 高速公路差异化收费研究综述[J]. 山东大学学报(工学版), 2023, 53(4): 18-29.

[5] 段莉珍, 何明卫, 何民, 等. 基于多源数据的高速公路差异化收费路段识别[J]. 北京交通大学学报, 2024, 48(3): 92-99.

[6] 胡宏宇, 张争光, 曲优, 等. 基于双分支和可变形卷积网络的驾驶员行为识别方法[J/OL]. 吉林大学学报(工学版), 1-12[2024-10-31]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230313>

[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.

[8] 曹一铄. 高速公路货车差异化收费定价策略研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.

[9] 闫丹丹, 刘拥华, 秦雅琴, 等. 基于两部制的高速公路收费定价方法[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2020, 45(6): 168-174.

[10] FIGUEIRAS P, GONÇALVES D, COSTA R, et al. Novel big data-supported dynamic toll charging system: impact assessment on portugal's shadow-toll highways[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 135: 476-491.

[11] 王林, 冯国帅, 吴双, 等. 汉宜高速公路分路段差异化收费费率研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(1): 183-190.

[12] WANG X, ZHANG D. Truck freight demand elasticity with respect to tolls in new york state[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2017, 101: 51-60.

[13] 孔德学. 高速公路可变收费对货车出行选择行为的影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.

[14] 李明. BOT运营模式的高速公路货车多维度差异收费决策方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.

[15] 闫晟煜, 詹振宇, 李艳红, 等. 外省籍货车对省域ETC差异化收费的影响分析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2022, 39(5): 608-614.

[16] WU W X, SHANG H Y. Determining the toll and capacity of a highway to be constructed in parallel with subway [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014(1): 721273.

[17] DEHNAVI E, ABDI H. Determining optimal buses for implementing demand response as an effective congestion management method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(2): 1.

[18] 肖清榆, 袁振洲, 吴玥琳, 等. 差异化收费条件下的货车出行行为研究[J]. 交通信息与安全, 2019, 37(5): 133-140.

[19] 冯雪松, 张路凯. 基于双层规划的危险化学品高速公路运输网络收费[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 710-715.

[20] LEE E, KIM D K, KHO S Y, et al. Segment-based differentiated pricing strategy for reducing congestion of expressways[J]. Journal of Korean Society of Transportation, 2014, 32(6): 675-685.