

低碳导向的网约车合乘意愿及激励策略

吴文静¹, 贾子曦¹, 贾洪飞¹, 杨旭¹, 卢国范²

(1. 吉林大学交通学院, 长春 130022; 2. 吉林省地方海事局, 长春 130016)

摘要:为推动城市交通方式的低碳转型, 将合乘出行的碳减排收益以合乘价格折扣的形式反馈给乘客以激励网约车合乘行为, 基于前景理论描述了激励策略下乘客的合乘出行意愿, 以平台总利润最大化和乘客广义出行成本节约最大化为目标函数, 考虑多人合乘匹配、平台利润、时间窗等约束条件, 构建了激励策略下的乘客-网约车合乘匹配模型并进行模型求解。以厦门市网约车实际运营数据为例进行算例研究, 从乘客、网约车平台视角分析激励策略对乘客广义出行成本、平台总利润及碳减排效果的影响过程。研究表明: 激励策略对促进乘客由非合乘向合乘出行选择转移具有积极意义; 以平台最优为目标可最大化碳减排效果, 但通常会造成乘客过多地绕行; 合乘价格折扣系数约在 0.40 时效果最佳, 可最大化促成多人合乘时兼顾乘客及平台的利益。

关键词: 交通运输规划与管理; 低碳出行; 网约车合乘; 激励策略; 碳收益

中图分类号: U121 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)09-2350-11

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250155

Low-carbon oriented carpooling willingness and incentive strategies for ride-hailing services

WU Wen-jing¹, JIA Zi-xi¹, JIA Hong-fei¹, YANG Xu¹, LU Guo-fan²

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Jilin Maritime Safety Administration, Changchun 130016, China)

Abstract: To promote the low-carbon transformation of urban transportation, the carbon emission reduction benefits of carpooling were returned to passengers in the form of price discounts, so as to incentivize the ride-sharing behavior in ride-hailing services. Based on prospect theory, passenger carpooling willingness under the incentive strategy was modeled. A carpooling matching model incorporating incentive mechanisms was developed, with two objective functions: maximizing the platform's total profit and maximizing passengers' generalized travel cost savings. The model accounts for multi-passenger carpooling, platform profitability, and time window constraints were solved using an optimization approach. A case study was conducted using real-world operational data from ride-hailing services in Xiamen City. From the perspectives of both passengers and the platform, the impact of the incentive strategy on passengers' generalized travel cost, platform profitability, and carbon emission

收稿日期: 2025-02-27.

基金项目: 吉林省教育厅科学研究项目 (JJKH20241297KJ); 吉林省交通运输技术提升与应用项目 (2026-1-7).

作者简介: 吴文静 (1980-), 女, 教授, 博士. 研究方向: 智能网联交通. E-mail: wuwj@jlu.edu.cn

通信作者: 贾洪飞 (1969-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 交通系统规划. E-mail: jiahf@jlu.edu.cn

reduction are analyzed. The results indicate that the incentive strategy has a positive significance in promoting passengers to shift from non-carpooling to carpooling. A platform-optimized strategy maximizes the carbon emission reduction but may lead to excessive detours for passengers. A fare discount rate of approximately 0.40 is found to be optimal, effectively promoting multi-passenger ride-sharing while balancing the interests of both passengers and the platform.

Key words: transportation planning and management; low-carbon travel; ride-sharing; incentive strategy; carbon revenue

0 引言

在“碳达峰、碳中和”的目标下,低碳化、集约化的合乘出行通过降低车辆的总行驶公里数减少交通能耗和碳排放量^[1,2],成为当前大力倡导的绿色低碳出行方式。但目前合乘比例还普遍较低,数据表明,滴滴快车和专车订单中合乘的比例只有6%左右^[3]。为提高合乘出行的吸引力,建立“低碳合乘出行”激励机制是关键。

为吸引乘客选择合乘,相关管理部门积极探索、完善合乘出行激励措施。北京市于2019年、2023年推出绿色出行一体化服务平台(MaaS1.0、MaaS2.0)及绿色出行碳普惠机制,通过发放公共交通优惠券、购物代金券等对市民选择绿色出行方式给予奖励^[4]。滴滴出行平台在2023年推出了“滴滴北京低碳出行合乘项目”^[5],利用经第三方机构核证后的出行数据对应的碳减排量为依据累积用户积分,并以兑换奖品的形式吸引乘客。此外,在理论研究方面,Rey-Merchan等^[6]认为节能减碳的补偿措施和拼车数字平台可以增加拼车者数量;Hu等^[7]提出一种司机和乘客成本分担机制,通过折扣方法补偿绕行产生的不便。李兴华等^[8]利用巢式Logit模型标定了社会经济属性及定价因素对拼车选择的影响,发现受访者对网约拼车折扣的敏感度更高。在此基础上,李振东等^[9,10]分析了考虑平台对乘客补贴的合乘定价策略和最优期望利润。Shen等^[11]研究了货币奖励金额与合乘参与度之间的关系。

从现有研究来看,碳普惠、积分这类形式因为没有切实转化为乘客的实际收益,导致乘客参与合乘的积极性偏低;而不考虑来源的补贴、折扣等经济补偿手段通常会对平台利润产生较大的消极影响,因此难以落实。

为实现“双碳”目标,国家出台了碳排放权交易(碳交易)政策,即允许将碳排放权作为一种商

品,使其可以在市场上自由流通。在此现实背景下,本文假设合乘碳减排收益可货币化为网约车平台的收益,那么问题就转换为如何分配这部分收益,从而实现促进合乘的目的。本文通过分析乘客合乘意愿、构建合乘匹配模型,分别从平台和乘客最优视角设计碳减排收益的分配策略,并从车辆利用效率、乘客绕行、碳减排等多个角度评估策略设计的合理性。

1 问题描述及假设

1.1 问题描述

假设某区域内有一定数量的乘客向网约车平台发送出行需求,平台在收集到乘客出行订单后,结合已知的路网节点和路段数据,通过模型运算进行乘客-网约车匹配。其中,乘客具有“合乘和非合乘”、“两人及多人合乘选择”的意愿。

对于合乘车辆,平台可通过信息化技术监测到车辆的合乘运营情况及相应的碳足迹,从而自动测算出合乘产生的碳减排量。这部分碳减排量可通过碳交易市场转化为碳信用,并将其根据市场价格进行挂牌交易,从而将碳减排货币化为本次合乘出行的碳收益。这部分收益将以合乘价格折扣的形式返回给乘客。

基于上述策略设计,可以推测出随着网约车合乘人数的增加,碳排放量逐渐减少,网约车平台获得的碳减排收益增大。为了提高合乘率,平台会提高合乘价格折扣,而乘客获得的价格折扣会促使乘客进一步选择合乘出行,从而形成“合乘选择-碳减排-价格激励”的正向循环。低碳导向的网约车合乘激励策略机制如图1所示。

在此合乘激励策略中,合乘价格折扣直接影响乘客合乘意愿和平台收益,是影响激励策略实施效果的关键因素:

(1)从平台角度,若价格折扣幅度过大,平台通过合乘所获碳收益难以弥补给予乘客的折扣,

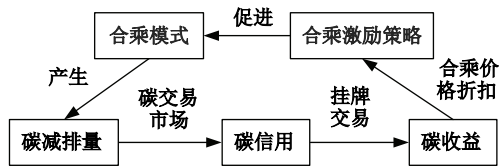


图1 低碳导向的网约车合乘激励策略机制图

Fig.1 Mechanisms of low-carbon orientated carpooling incentive strategies for ride-hailing services

从而削弱平台的整体效益;反之,若折扣幅度过小,则对出行者选择合乘的激励作用微弱,乘客合乘出行意愿不高,不利于平台碳减排目标的实现及其收益转化。

(2)从乘客角度,价格折扣幅度直接影响乘客参与合乘及多人合乘的意愿。由于合乘不可避免会产生绕行、延误、舒适性下降等负面效应,因此如果折扣幅度过小,不足以弥补合乘的缺陷,将难以实现激励两人及多人合乘的目标。

1.2 研究假设

激励策略涉及合乘意愿、合乘匹配及碳排测算等多个模型的联合构建,为降低模型复杂度,本文进行如下假设:①车辆匀速行驶,路网状态良好,不考虑拥堵和干扰;②车辆数量充足,所有车辆类型相同,最大载客量为4(不包括司机),车辆每次载客不超其剩余载客量;③所有乘客均具有合乘意愿。

2 模型构建

2.1 模型参数及变量

为方便对模型中的参数和变量进行描述,现将模型中涉及的相关参数和变量整理为表1。

2.2 乘客广义出行成本函数构建

乘客的广义出行成本包括时间成本、乘车价格成本。本文定义乘客*i*的出行订单为 $Q_i = (o_i, d_i, t_i^p, t_i^a)$ 。

2.2.1 合乘出行成本

(1)时间成本

在合乘模式下,车辆需要在行程中服务多名乘客的上下车需求,从而产生合乘乘客的出发和到达延迟,与单独出行相比增加了乘客的时间成本。现以图2所示的两人合乘先上先下和两人合乘先上后下为例,分析乘客合乘的出发延迟和到达延迟。

由图2可知,在不同乘车顺序下,第一个上车的乘客*i*由于合乘会产生绕路导致延误,所以其

表1 参数说明

Table 1 Parameter descriptions

参数	描述说明
i, j	乘客编号, $i, j = 1, 2, \dots, n$
Q_i	乘客 <i>i</i> 的订单, $Q_i \in Q$
o_i, d_i	乘客 <i>i</i> 出行的起点、终点
t_i^p, t_i^a	乘客 <i>i</i> 非合乘的出发、到达时刻
$\hat{t}_i^p, \hat{t}_i^a$	乘客 <i>i</i> 合乘的出发、到达时刻
$\hat{t}_i/h$	合乘模式下乘客 <i>i</i> 的出行时间
$\hat{l}_i/km$	乘客 <i>i</i> 完成合乘出行的距离
λ	合乘价格折扣系数
$c_0, c_{d0}/\text{元}$	乘客、司机端基础里程价格
$\lambda^{ns}, \lambda^d/(\text{元}/km)$	乘客、司机端单位里程运价
L_0/km	基础里程阈值
$\beta^t/(\text{元} \cdot h^{-1})$	时间价值
β^d, β^s	延迟惩罚系数、不舒适系数
Q_r	r 组乘客订单, $r \in R, Q_r \in Q$
O_r, D_r	r 组乘客出行起点、终点序列
$\hat{t}_{r,1}^p$	r 组乘客的出发时刻
l_r^s/km	组乘客的总行驶距离
$\delta_i, \delta_j/h$	乘客 <i>i, j</i> 可接受的最大出发延迟
$\bar{v}/(km \cdot h^{-1})$	车辆的平均行驶速度
$p_{CO_2}/(\text{元} \cdot kg^{-1})$	单位质量碳排放量的交易价格

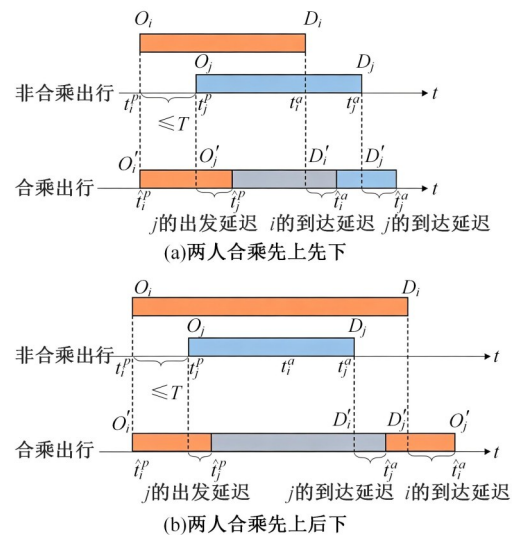


图2 不同乘车顺序下乘客出行时间示意图

Fig.2 Schematic diagram of passenger travelling time under different ride sequences

到达延迟为 $\hat{t}_i^a - t_i^a$;后续上车的乘客*j*出发延迟为 $\hat{t}_j^p - t_j^p$,到达延迟为 $\hat{t}_j^a - t_j^a$ 。合乘中的延迟在增加出行时间的同时,加剧了乘客的不便利性,因此引入延迟惩罚系数 β^d 以量化额外的心理负担;此外,合乘的实现需要乘客之间共享同一车辆及部分出行路径,从而降低了乘客的舒适性,本文用不

舒适系数 β^s 衡量。考虑时间转为成本的价值系数 β^t 、时间延迟惩罚和舒适度后,合乘模式下的时间成本 T_i^s 可表示为:

$$T_i^s = \beta^t \beta^s \left[\hat{t}_i + \beta^d \left((\hat{t}_i^p - t_i^p) + (\hat{t}_i^a - t_i^a) \right) \right] \quad (1)$$

(2) 乘车价格成本

假设平台的合乘价格折扣系数为 λ ,则合乘模式的单位里程价格 λ^s 可表示为:

$$\lambda^s = \lambda \cdot \lambda^{ns} \quad (2)$$

因此,考虑合乘激励的乘车价格成本 $f_{i,r}^s$ 为:

$$f_{i,r}^s = \begin{cases} c_0, & \hat{l}_i \leq L_0 \\ c_0 + \lambda^s (\hat{l}_i - L_0), & \hat{l}_i > L_0 \end{cases} \quad (3)$$

(3) 广义出行成本

在合乘激励策略下,由多个乘客构成的合乘组 r 中,乘客 i 的合乘广义出行成本 $U_{i,r}^s$ 为优惠后的合乘价格成本与考虑延迟的时间成本之和,即:

$$U_{i,r}^s = f_{i,r}^s + \beta^t \beta^s \left[\hat{t}_i + \beta^d \left((\hat{t}_i^p - t_i^p) + (\hat{t}_i^a - t_i^a) \right) \right] \quad (4)$$

2.2.2 非合乘广义出行成本

在非合乘模式下,时间成本只与完成订单的行驶时间有关,因此其广义出行成本 U_i^{ns} 只与非合乘出行的价格 f_i^{ns} 和非合乘出行的时间 t_i 有关,即:

$$U_i^{ns} = f_i^{ns} + \beta^t t_i \quad (5)$$

$$f_i^{ns} = \begin{cases} c_0, & l_i \leq L_0 \\ c_0 + \lambda^{ns} (l_i - L_0), & l_i > L_0 \end{cases} \quad (6)$$

2.3 基于前景理论的乘客合乘选择意愿

乘客是否参与合乘出行,本质上是一种涉及不确定性收益和损失的决策问题,即乘客在选择时会受到主观感知的合乘损失(绕行、不舒适等)规避效应和非合乘模式的参考点效应影响,而非依据绝对理性的最大化收益。前景理论能够结合客观的经济收益和主观的损失规避,适用于研究此类出行决策问题。对于乘客的合乘选择,可将参考点 I_{i0} 定义为原始非合乘模式下的乘客广义出行成本:

$$I_{i0} = U_i^{ns} \quad (7)$$

合乘模式下乘客广义出行成本与参考点的偏离程度 Δx_i 可表示为:

$$\Delta x_i = -(U_{i,r}^s - I_{i0}) \quad (8)$$

当 $\Delta x_i \leq 0$ 时,乘客认为合乘选择会使其利益受损;当 $\Delta x_i > 0$ 时,乘客认为自身受益。基于偏

离程度进一步构造价值函数 $V(\Delta x_i)$:

$$V(\Delta x_i) = \begin{cases} (\Delta x_i)^\alpha, & \Delta x_i > 0 \\ -\rho(-\Delta x_i)^\beta, & \Delta x_i \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: α 和 β 为风险态度系数,取值越大,乘客越倾向于冒险; ρ 为损失敏感系数,反映乘客的损失敏感程度。根据已有研究^[12], $\alpha = \beta = 0.88$ 、 $\rho = 2.25$ 时,更符合出行者决策的心理特征。

在价值函数的基础上,采用Logistic函数的形式描述乘客 i 选择合乘的客观概率 $P_{i,r}^s$:

$$P_{i,r}^s = \frac{1}{1 + e^{-\gamma V(\Delta x_i)}} \quad (10)$$

式中: γ 为乘客的敏感性参数。

根据前景理论,用权重函数 $W(P_{i,r}^s)$ 描述在多重不确定性因素的影响下,乘客选择合乘的最终主观感知概率,如下所示:

$$W(P_{i,r}^s) = \begin{cases} \frac{(P_{i,r}^s)^\chi}{\left[(P_{i,r}^s)^\chi + (1 - P_{i,r}^s)^\chi \right]^{1/\chi}}, & \Delta x_i > 0 \\ \frac{(P_{i,r}^s)^\mu}{\left[(P_{i,r}^s)^\mu + (1 - P_{i,r}^s)^\mu \right]^{1/\mu}}, & \Delta x_i \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: χ 、 μ 决定权重函数的曲率。参考文献^[13], $\chi = 0.61$ 、 $\mu = 0.69$ 时,最能反映出行决策者的个人行为。

由式(11)可知, $W(P_{i,r}^s)$ 体现了乘客的合乘意愿与广义出行成本的关系,其取值越大,乘客的合乘意愿越高,更可能加入对应的合乘组,即当 $U_i^{ns} < U_{i,r}^s$ 时, $W(P_{i,r}^s)$ 更大,乘客更倾向于选择合乘,反之,则更倾向于非合乘模式。

在前景理论中,乘客的合乘选择是基于合乘模式的广义出行成本 $U_{i,r}^s$ 与非合乘模式的广义出行成本 U_i^{ns} 之间的相对偏差 Δx_i 来评估合乘的损益。由式(4)(5)可知,价格成本作为 $U_{i,r}^s$ 、 U_i^{ns} 的组成部分,直接影响广义出行成本的高低,进而影响乘客合乘意愿。因此,合乘价格折扣等激励策略通过改变 $U_{i,r}^s$ 、 U_i^{ns} 的大小确定乘客的合乘主观概率 $W(P_{i,r}^s)$,三者在乘客角度共同影响了合乘优化目标和约束条件,决定了最终的合乘匹配策略和最优价格折扣方案。

2.4 优化模型

在合乘激励策略中,合乘价格折扣水平直接

影响乘客合乘选择意愿和网约车平台的收益。本文从乘客视角和网约车平台视角构建优化模型,以期获得合乘价格折扣对双方的影响规律。

2.4.1 乘客角度

假设乘客在做出合乘选择时会重点关注合乘模式带来的广义出行成本节约。定义合乘组 $Q_r = (O_r, D_r, \hat{l}_{r,1}^p)$ 的期望广义出行成本节约为 V_r , 则乘客角度的目标函数为广义出行成本节约最大化:

$$\arg \max_{r \in R} \sum V_r = \arg \max_{r \in R} \sum \left[\sum_{i \in Q_r} W(P_{i,r}^s) \cdot (U_{i,r}^{ns} - U_{i,r}^s) \right] \quad (12)$$

2.4.2 网约车平台角度

网约车平台作为运营方基于合乘激励策略进行合乘组的匹配时,需考虑影响其总利润的各因素,包括平台运营收入、司机分成、合乘碳减排收益等。

(1) 运营收入

根据网约车平台运营核算的实际情况,平台的运营收入 R 包括合乘与非合乘两种模式下所有出行乘客支付的乘车费用:

$$R = \sum_{r \in R} \left(\sum_{i \in Q_r} f_{i,r}^s \right) + \sum_{i \notin Q_r} f_i^{ns} \quad (13)$$

(2) 司机收入

通常网约车平台在司机端和乘客端设定不同的运价,网约车平台从每笔订单乘客支付的费用中抽取一定比例作为司机收入 C_{driver} 。

$$C_{\text{driver}} = \begin{cases} c_{d0}, & l_i \leq L_0 \\ c_{d0} + \lambda^d (l_i - L_0), & l_i > L_0 \end{cases} \quad (14)$$

(3) 碳减排收益

由图 2 可知,合乘模式使多个乘客的需求被集中到一辆车上进行服务,避免了因单独出行带来的多次行驶,在低碳视角下节约了平台车辆行驶总里程,从而为平台累积碳减排量,并进一步货币化为碳减排收益。平台因合乘模式节约的车辆行驶总里程 Δl 可表示为:

$$\Delta l = \sum_{r \in R} \left(\sum_{i \in Q_r} l_i^{ns} - l_r^s \right) \quad (15)$$

式中: $\sum_{i \in Q_r} (l_i^{ns} - l_r^s)$ 为单次合乘出行的行驶里程节约。

本文设计的激励策略重点关注整体路网层面

因合乘产生的碳排放总量差异,因此选择宏观角度下基于平均速度的道路交通排放计算模型(Computer programme to calculate emissions from road transport, COPERT)测算碳减排总量。网约车在服务订单过程中累积产生的碳排放量通常与订单的服务距离成正比,在节约了已知网约车平台合乘模式下的车辆行驶总里程后,平台碳减排总量 E_{CO_2} 为:

$$\begin{cases} E_{\text{CO}_2} = F \cdot \Delta l = F \cdot \sum_{r \in R} \left(\sum_{i \in Q_r} l_i^{ns} - l_r^s \right) \\ F = \frac{\alpha \cdot \bar{v}^2 + \beta \cdot \bar{v} + \gamma + \delta / \bar{v}}{\varepsilon \cdot \bar{v}^2 + \zeta \cdot \bar{v} + \eta} \end{cases} \quad (16)$$

式中: F 为机动车排放因子,即车辆行驶单位里程排放的污染物量, g/km ; $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta$ 为 COPERT 模型中计算碳排放因子的参数,将其按照小型汽油燃油类乘用车、国 IV 排放标准,并参考文献[14]取值,进一步计算得到机动车排放因子 F 为 175.153 g/km 。

测算出的碳减排量被转化为碳信用后,平台可根据市场价格将其出售,从而获得合乘出行下的碳减排收益 Sub:

$$\text{Sub} = E_{\text{CO}_2} \cdot p_{\text{CO}_2} \quad (17)$$

式中: p_{CO_2} 的取值根据文献[15]和碳交易市场的实际情况确定。

(4) 目标函数

网约车平台角度的目标函数为考虑合乘碳减排收益、平台运营收入、司机分成后的总利润最大化:

$$\arg \max P = \arg \max (R - C_{\text{driver}} + \text{Sub}) \quad (18)$$

2.4.3 约束条件

$$|t_i^p - t_j^p| < T, \quad \forall i, j \in Q_r \quad (19)$$

$$\hat{l}_i^p + \delta_j \geq \hat{l}_i^p - \delta_i \quad (20)$$

$$\hat{l}_j^p - \delta_j \leq \hat{l}_i^p + \delta_i \Leftrightarrow \hat{l}_j^p - \delta_j \leq \hat{l}_i^p + \hat{l}_i + \delta_i \quad (21)$$

$$\hat{l}_i^p + t(o_i, o_j) + \delta_i \geq \hat{l}_j^p - \delta_j \quad (22)$$

$$\hat{l}_i^p + t(o_i, o_j) - \delta_i \leq \hat{l}_j^p + \delta_j \quad (23)$$

$$\begin{aligned} & \left[\sum_{r \in R} \left(\sum_{i \in Q_r} f_{i,r}^s \right) + \sum_{i \notin Q_r} f_i^{ns} \right] - C_{\text{driver}} + \\ & \text{Sub} > \left(\sum_{i \in Q} f_i^{ns} \right) - C_{\text{driver}} \end{aligned} \quad (24)$$

式(19)表示若乘客 i, j 参与合乘,则两者单独出行时的出发时刻间隔不超过出发时刻间隔阈值 T ,即避免合乘模式下乘客的等待时间过长;

式(20)(21)表示乘客 i 的最早出发时刻应早于乘客 j 的最晚出发时刻,乘客 j 的最早出发时刻应早于乘客 i 的最晚到达时刻,即保证合乘匹配结果在时序上可执行;式(22)(23)表示从 o_i 起点出发到达 o_j 起点的时间窗应与 o_j 起点的时间窗有交集,即能在时间窗约束内接到两名乘客;式(24)表示网约车平台提供合乘服务获得的总利润应高于不提供合乘服务时的总利润,即从运营方的角度保证合乘激励策略的现实可行性。

3 算法设计

当乘客向网约车平台提出一次出行请求时,平台会根据合乘匹配系统建立的总目标对某区域内乘客进行合乘组匹配及合乘线路规划,同时也会为不满足合乘条件的乘客单独分配车辆。为求解模型目标函数并保证求解速度,本文将考虑碳收益的合乘匹配模型转化为指派问题,从而利用0-1整数规划方法进行求解。算法具体步骤如下所示。

步骤1 确定两人合乘匹配的组织形式及约束条件。假设合乘乘客分别为 i 和 j ,其存在4种可能的合乘组织形式,如图3所示。在所有可能的两人匹配方案中按照2.4.3节中的约束条件进行可行匹配筛选。

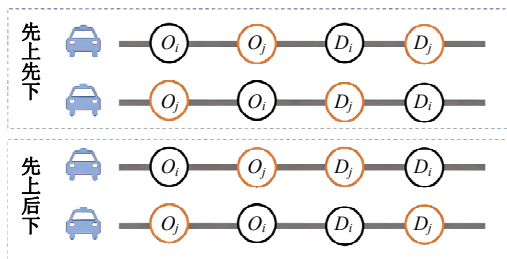


图3 两人合乘的组织形式

Fig. 3 Organization of two-passenger carpooling

步骤2 构建可合乘网络。对于所有满足两人合乘约束的匹配结果,构建一个多有向边的可合乘网络图。该图中的节点代表乘客 i 订单 Q_i ,有向边 $r_{i,j}$ 表示两乘客的合乘顺序,如图4所示。

步骤3 多人合乘匹配拓展。在满足新加入的乘客必须与现有组内所有乘客直接相连的前提下,基于两人合乘匹配的结果,利用可合乘网络图扩展至多人合乘。以厦门市为例,结合路径规划的多人合乘组出行路径示意图如图5所示。

步骤4 定义最优匹配问题。将最优匹配方案的问题描述为指派问题,建立乘客选择参与第

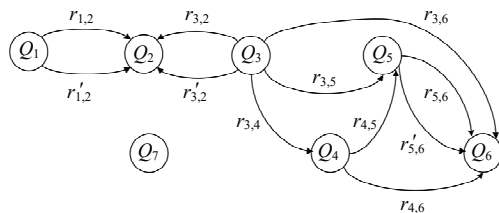


图4 可合乘网络示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the carpooling network

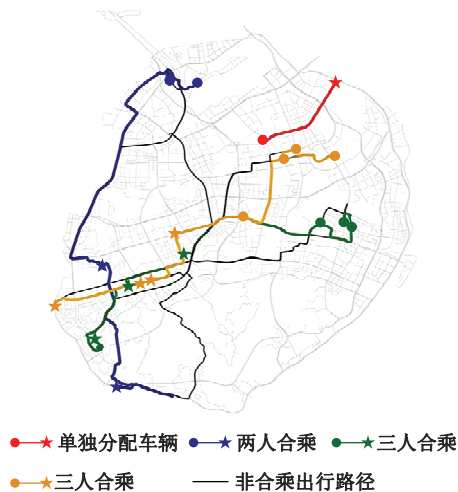


图5 多人合乘组出行路径图

Fig. 5 Travel route diagram for multi-passenger carpooling groups

r 组合乘的状态矩阵和合乘组的匹配选择决策向量。

步骤5 设定目标函数和求解方案。在步骤3得到的多人合乘组基础上,根据乘客总出行成本节约最大化及网约车平台总运营利润最大化,利用Python中的PuLP库构建模型并求解。

4 算例分析

4.1 基础数据处理

为充分体现网约车合乘在城市日常通勤模式下的碳减排潜力,保证规模化合乘匹配的形成,本文以厦门市湖里区2020年6月27日高峰时段8:00~8:30的网约车需求数据为样本,通过数据清洗去除重复数据、缺失数据和无效数据,最终共获取1 034次乘客出行信息。

在获得订单信息后,通过开放街道地图(Open street map, OSM)向Python中导入厦门市路网共4 958个节点数据和10 948条路段数据以构建路网无向图,并获取路网上距离乘客起讫点经纬度最近的节点代替出行起讫点进行最短路的计算。

4.2 算法求解

结合厦门市网约车现阶段实行的运价计费标准与文献[16]中对时间价值的相关研究,确定算例涉及的模型参数取值如表 2 所示。

表 2 模型参数

Table 2 Model parameters

参数	取值
L_0/km	2
乘客端起步价 $c_0/\text{元}$	12
司机端起步价 $c_{d0}/\text{元}$	11
乘客端单位里程运价 $\lambda^m/(\text{元}\cdot\text{km}^{-1})$	2
司机端单位里程运价 $\lambda^d/(\text{元}\cdot\text{km}^{-1})$	1.1
$\bar{v}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	30
β^s	1.2
$\beta^t/(\text{元}\cdot\text{h}^{-1})$	40
β^d	1.2
$p_{\text{CO}_2}/(\text{元}\cdot\text{kg}^{-1})$	14

大规模的合乘匹配问题由于出行需求间存在大量匹配可能性,导致计算复杂度急剧增加。为提高算法效率,本文依据 2.4.3 节中各项约束条件对合乘组进行初步筛选,从而有效缩小求解空间,并进一步计算可行匹配解。

以合乘价格折扣系数为 0.40 时的求解结果为例,通过逐步叠加约束条件,分析不同约束对解空间缩减的具体影响,将结果可视化如图 6。

图 6 中,黑色点位构成的黑色区域表示满足当前约束条件的可行匹配解;白色区域为被约束

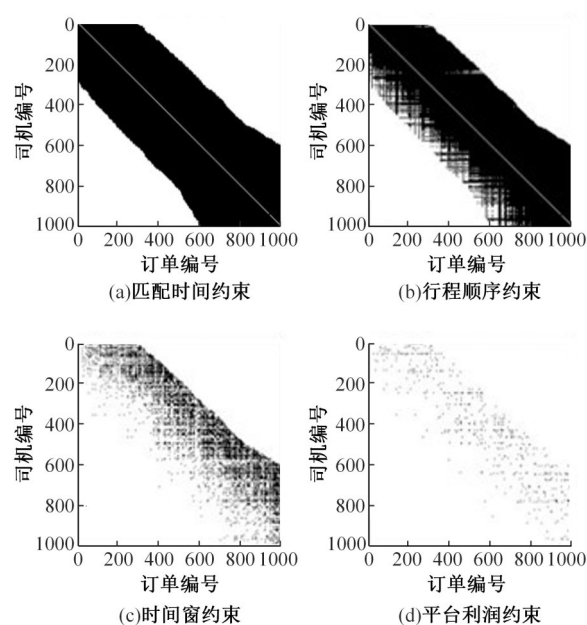


图 6 可行解数量图

Fig. 6 Diagram of feasible solution quantities

筛选掉的匹配方案,白色对角线表示乘客无法与自身进行合乘。由图 6 可知,随着约束条件叠加递进,可行解集和解空间显著缩小,最终在所有约束条件的共同作用下,筛选出满足所有约束的合乘匹配解集,从而有效降低计算复杂度。

4.3 结果分析及对比

通过调整合乘价格折扣系数,并利用本文算法,分别基于合乘双方的目标函数求解合乘匹配结果,得到在网约车平台利润最大化和乘客广义出行成本节约最大化两种目标函数下的最优合乘激励策略及相应指标值,如表 3 所示。

表 3 合乘激励策略及其指标值

Table 3 Carpooling incentive strategies and their indicator values

指标	乘客最优	平台最优
合乘价格折扣系数	0.40	0.55
合乘比例/%	38.17	59.01
广义出行成本节约/元	1 537.92	1 503.25
乘车时间节约/h	40.46	63.79
乘客绕行总时间/h	10.56	26.89
碳减排量/kg	212.57	335.20
平台利润/元	5 419.36	5 559.11

由表 3 可知,乘客和网约车平台均能通过最优合乘激励策略实现各自的优化目标。平台最优视角下,策略实施更倾向于提升系统效率和碳减排收益;而乘客最优视角下,策略则侧重于避免合乘乘客绕行现象,符合现实场景中合乘模式的实际运营情况。

两种最优激励策略均有效提升了合乘比例。在平台最优视角下,合乘比例达到最高值 59.01%,显著高于乘客最优视角下的 38.17%。相应地,平台最优视角下的碳减排量也达到最大值 335.20 kg,表明通过合理设计激励策略,能够在实现平台收益最大化的同时显著促进合乘出行模式的达成。

在运力资源节约方面,平台最优视角下的乘车时间节约最高,为 63.79 h,较乘客最优视角下的 40.46 h 提升了 57.67%,体现了合乘对整体交通资源利用效率的显著优化。然而在乘客最优视角下,算法在绕行总时间上表现更优,仅为 10.56 h。因此,虽然更高的合乘比例能够显著提升车辆使用效率并减少空驶现象,但也导致了乘客过多的绕行和出行不便性。

5 敏感性分析

分析价格折扣对合乘匹配、成本及利润的影响,从而评价不同折扣系数下合乘系统实际运行的有效性,为设计既符合低碳发展目标又能兼顾多方利益的激励策略提供依据。

5.1 合乘组规模分析

根据前景理论,激励策略通过调节价格折扣系数影响乘客的出行广义成本,进而影响乘客合乘及多人合乘的意愿,从而导致合乘组规模的变化。图 7 和表 4 分别为不同合乘价格折扣系数对合乘组规模及合乘比例的影响和具体数值的变化情况。

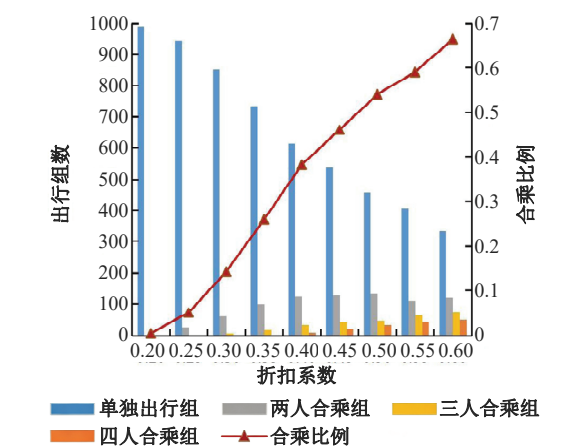


图 7 折扣系数对合乘组规模及合乘比例的影响
Fig. 7 Impact of discount rate on carpool group size and proportion

表 4 数值变化情况

折扣系数	单独出行组	两人合乘组	三人合乘组	四人合乘组	合乘比例/%
0.20	989	2	0	0	0.40
0.25	943	25	0	0	5.04
0.30	852	60	7	0	14.20
0.35	736	99	17	2	25.88
0.40	614	124	33	8	38.17
0.45	536	127	41	20	46.02
0.50	457	133	46	33	53.98
0.55	407	111	64	43	59.01
0.60	334	120	73	50	66.36

由图 7 可知,乘客合乘比例与折扣系数呈正相关关系。对于两人合乘组,折扣系数由 0.20 上升至 0.50 时,合乘组数由 2 组增加到 133 组,随后在折扣系数为 0.60 时,下降到 120 组,整体呈先上升后下降的趋势。相比之下,三人合乘组和四

人合乘组的数量则持续增长。
上述现象表明,随着折扣系数的增大,乘客合乘意愿逐渐由两人向多人合乘模式转变,从而形成两人合乘组数先上升后下降的特征。尽管三人合乘和四人合乘将增加合乘的绕行时间和不便性,但价格折扣有效降低了乘客的合乘广义出行成本,进而提高乘客对多人合乘不舒适性的容忍度。

5.2 乘客广义出行成本分析

改变合乘价格折扣系数并循环求解乘客广义出行成本节约,得到折扣系数与合乘广义出行成本节约的关系图,如图 8 所示。

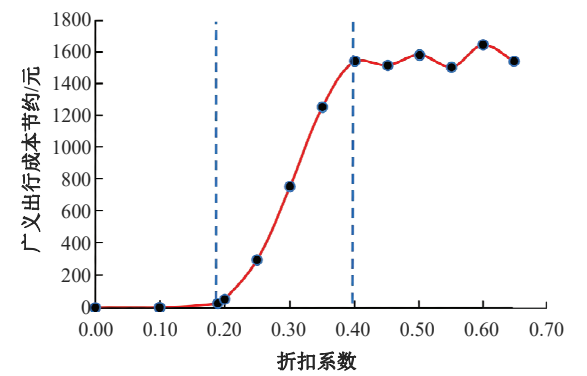


图 8 折扣系数对乘客广义出行成本节约的影响
Fig. 8 Impact of discount rate on passengers' generalized travel cost savings

由图 8 可知,随着折扣系数的增大,乘客合乘广义出行成本节约曲线呈先上升后逐渐平缓的 S 型变化趋势,具体可分为 3 个阶段:

- (1) 当 $\lambda < 0.19$ 时,合乘广义出行成本节约几乎为零。这是因为,此时合乘价格折扣系数较低,不足以抵消合乘造成的不便及不舒适感,因此乘客的合乘比例也相对较低。此阶段的合乘激励策略对乘客的吸引力不足。
- (2) 当 $0.19 \leq \lambda < 0.40$ 时,随着折扣系数的增大,乘客合乘广义出行成本节约不断上升。在该阶段,合乘模式的吸引力增强,乘客在享受更高价格折扣的同时愿意接受绕行和不舒适性,合乘激励策略呈现出明显的正向激励效应。
- (3) 当 $\lambda \geq 0.40$ 时,乘客合乘广义出行成本节约变化趋于平缓。尽管此时折扣系数还在增大,但广义出行成本节约已接近饱和,合乘激励策略失去了规模效益,即乘客为获取更高折扣所能承担的绕行和不舒适性达到了临界点,进一步提高折扣系数不能继续实现显著的成本节约,激励效果不明显。

因此,从乘客角度出发的合乘激励策略对应的最优价格折扣系数为 0.40,结合表 3 可知,此时合乘比例为 38.17%,且能够在保证乘客合理的出行成本节约同时,避免过高折扣带来的不舒适性和过多的绕行时间。

5.3 网约车平台总利润分析

为直观分析合乘激励策略下价格折扣和合乘碳减排收益对平台利润的影响,在不同情景下改变价格折扣系数,得到折扣系数与网约车平台总利润的关系,如图 9 所示。

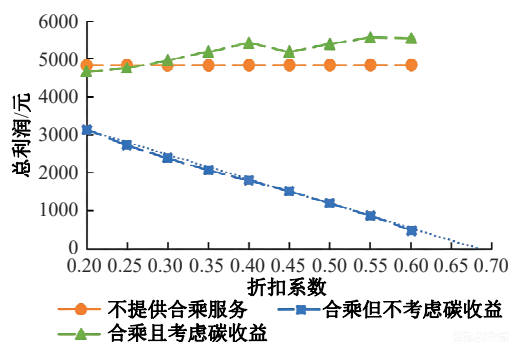


图 9 折扣系数对网约车平台总利润的影响

Fig. 9 Impact of discount rate on total profit of ride-hailing platforms

由图 9 可知,平台总利润随折扣系数的变化呈现出阶段性特征:

(1) 当 $\lambda < 0.25$ 时,网约车平台的合乘利润低于不采取合乘运营模式的利润,不足以吸引网约车平台提供合乘服务。此时有限的合乘比例所累积的平台碳减排收益较低,无法弥补价格折扣产生的收入损失,合乘激励策略对平台而言没有明显的经济效益。

(2) 当 $0.25 \leq \lambda < 0.40$ 时,网约车平台提供合乘服务利润逐步高于非合乘服务的利润,且结合图 7 可知,该区间对应合乘比例实现了大幅度提升。这表明适中的合乘价格折扣既能有效激励乘客的合乘意愿,又能通过合乘累积的碳减排收益提高平台的总利润,合乘激励策略对提升合乘比例和平台收益均具有积极作用。

(3) 当 $\lambda \geq 0.40$ 时,合乘利润继续增加,但增速趋于平缓,即对于平台而言,激励策略的边际收益逐渐递减。当折扣系数为 0.55 时,平台在考虑碳减排收益的情况下,通过提供合乘服获得的总利润达到峰值。在折扣系数大于 0.55 之后,总利润趋于稳定,由此可知,过高的折扣不再显著提升合乘比例,合乘率达到饱和。

因此,从平台角度出发,合乘价格折扣系数最优取值应控制在 $0.40 \leq \lambda < 0.55$ 区间内,此时能够在提升合乘比例的同时保证平台总利润和碳减排收益。

6 碳足迹及碳减排效果分析

为进一步探究合乘激励策略对于区域路网层面的碳减排优化特征,本文在不同价格折扣系数下对所有订单产生的碳排放量进行测算,并将其加载至路网上实现可视化分析,利用图像亮度(即灰度值)表示碳排放强度,路段碳排放强度越高,灰度值越小,如图 10 所示(彩图参见电子版)。其中,将灰度值划分为 3 个区间:对于整个路网而言,灰度值小于 0.33 时,表示路段碳排放强度相对较高,用红色表示;灰度值为 0.33~0.66 时,表示碳排放强度中等,用蓝色表示;灰度值大于 0.66 时,表示碳排放强度相对较低,用灰色表示。

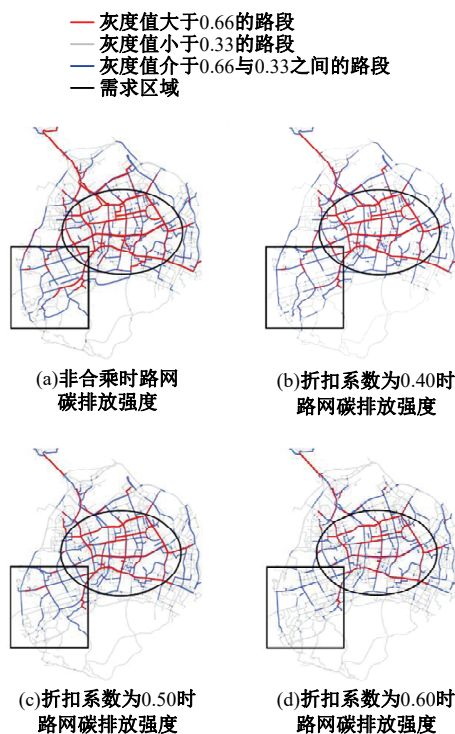


图 10 路网碳排放强度示意图

Fig. 10 Schematic diagram of road network carbon emission intensity

由图 10 可知,随着价格折扣系数的上升,整体路网的碳排放强度逐渐降低,红色路段占比减少,部分路段转为蓝色或灰色,且在高出行需求区域(黑色椭圆形)和次级出行需求区域(黑色矩形)内的作用更为显著。该结果表明,合乘激励策略

能够有效降低重点区域的碳排放强度。此外,折扣系数越高,碳减排效果越明显,体现了合乘激励策略在缓解交通碳排放压力中的潜在价值。

7 结束语

针对合乘出行选择比例普遍较低的现状,本文从低碳出行的视角出发,考虑合乘碳减排收益,从乘客和网约车平台的角度设计了合乘激励策略及模型求解算法,并在乘客最优和平台最优的层面分别探讨了策略实施的效果。主要结论如下:①本文综合考虑合乘造成的延误、不舒适性和价格折扣等因素,从乘客广义出行成本的角度,基于前景理论构建了乘客合乘选择意愿模型。②分别从乘客和网约车平台双重视角进行优化,建立了合乘激励策略下的乘客-网约车匹配模型,设计了合乘匹配算法,并基于整数规划思想对合乘组进行最优求解。③选取厦门市为实际研究算例,利用本文模型和算法,确定了最优合乘激励策略,并从乘客、网约车平台以及碳减排3个维度对激励策略的效果进行评价分析。结果表明,合乘激励策略能够促进乘客的选择意愿向合乘模式转移,当折扣系数由0.19增加到0.40时,乘客广义出行成本节约的增加幅度最大,合乘比例大幅提升;当折扣系数为0.55时,网约车平台的总利润达到最大值。同时,碳减排效果随折扣系数的提高而增强,说明网约车平台通过引入碳收益机制激励合乘出行行为,能够在获得额外经济收益的同时优化运营效率。本文中嵌入的COPERT模型可进一步替换为适用于新能源车辆的碳排放测算模型,保证了本文激励策略对不同类型网约车的适用性,从而在政策与市场化机制之间实现有效衔接,为交通领域的低碳经济发展提供参考。

参考文献:

- [1] Li W X, Wang L, Pu Z Y, et al. What determines the real-world CO₂ emission reductions of ridesplitting trips?[J]. *Travel Behaviour and Society*, 2024, 35: No. 100734.
- [2] 贾洪飞,邵子函,杨丽丽. 终点不确定条件下网约车合乘匹配模型及算法[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2022, 52(3): 564-571.
Jia Hong-fei, Shao Zi-han, Yang Li-li. Ride-sharing matching model and algorithm of online car-hailing under condition of uncertain destination[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2022, 52(3): 564-571.
- [3] Xiao L L, Liu T L, Huang H J. On the morning commute problem with carpooling behavior under parking space constraint[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, 91: 383-407.
- [4] 北京市交通委员会. 北京市交通委员会北京市生态环境局关于印发《北京MaaS2.0工作方案》的通知[EB/OL]. [2025-01-15]. https://jtw.beijing.gov.cn/kjjt/tzgg/202306/t20230627_3147334.html.
- [5] 北京市生态环境局. 北京市生态环境局关于滴滴北京低碳出行合乘项目设计文件的公示[EB/OL]. [2025-01-15]. <https://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/xxgk69/zfxxgk43/fdzdgknr2/325924085/436464568/index.html>.
- [6] Rey-Merchan M, Fernandez V, Lopez-Arquillos A, et al. Carpooling for sustainable commuting: a review [C]//Universidad de Malaga, Guimaraes, Portugal, 2022: 144-146.
- [7] Hu S, Dessouky M M, Uhan N A, et al. Cost-sharing mechanism design for ride-sharing[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021, 150: 410-434.
- [8] 李兴华,冯飞宇,成诚,等. 网约拼车服务选择偏好分析及建模[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2022, 52(3): 578-584.
Li Xing-hua, Feng Fei-yu, Cheng Cheng, et al. Choice preference analysis and modeling of ridesplitting service[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2022, 52(3): 578-584.
- [9] 李振东,郭敏. 考虑出行者低碳偏好的网约车平台定价策略[J]. *中北大学学报:自然科学版*, 2023, 44(1): 8-15.
Li Zhen-dong, Guo Min. Pricing strategies of ride-hailing platforms considering travelers' low-carbon preferences[J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2023, 44(1): 8-15.
- [10] 李振东. 考虑平台补贴的网约车平台定价研究[D]. 太原: 中北大学经济与管理学院, 2023.
Li Zhen-dong. Research on pricing of online car-hailing platform considering platform subsidy[D]. Taiyuan: School of Economics and Management of North University of China, 2023.
- [11] Shen B, Cao B, Zhao Y, et al. Roo: Route planning algorithm for ride sharing systems on large-scale road

- networks[C]//2019 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing, Kyoto, Japan, 2019: 1-8.
- [12] 陈林. 基于心理账户论的交通决策行为建模分析[D]. 成都: 西南交通大学交通运输与物流学院, 2017.
- Chen Lin. Modeling analysis the travel choice behavior based on mental accounting[D]. Chengdu: School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, 2017.
- [13] Tversky A, Kahneman D. Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty[J]. Journal of Risk and Uncertainty, 1992, 5(4): 297-323.
- [14] Cheng J H, Wang Z, Zhou H Y, et al. DM-SLAM: a feature-based SLAM system for rigid dynamic scenes[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9(4): No. 202.
- [15] Chen J Q, Peng D P, Liu Z W. A sustainable model for forecasting carbon emission trading prices[J]. Sustainability, 2024, 16(19): No. 8324.
- [16] 郭麦菊, 厉行, 雷莹, 等. 时间的价值: 基于共享出行平台的实证研究[J]. 营销科学学报, 2021, 1(2): 39-59.
- Guo Mai-ju, Li Xing, Lei Ying, et al. The value of time: an empirical study on a ride-sharing platform [J]. Journal of Marketing Science, 2021, 1(2): 39-59.