

控制与决策

Control and Decision

允许中转与绕行的众包同城配送司机包裹匹配优化

杨华龙, 梁晓萍, 王征, 吴琼

引用本文:

杨华龙, 梁晓萍, 王征, 吴琼. 允许中转与绕行的众包同城配送司机包裹匹配优化[J]. *控制与决策*, 2024, 39(3): 1021–1029.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0687>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

平台品牌赋能情境下考虑信息不对称的供应链渠道冲突

Supply chain channel conflicts considering asymmetric information under platform brand empowerment

控制与决策. 2021, 36(9): 2123–2132 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0098>

基于粒子群算法的满载需求可拆分车辆路径规划

Split vehicle route planning with full load demand based on particle swarm optimization

控制与决策. 2021, 36(6): 1397–1406 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1323>

基于时空聚类求解带容积约束的选址-路径问题

Time-space cluster based location-routing problem with capacitate constraints

控制与决策. 2021, 36(10): 2504–2510 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0073>

考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题

Vehicle routing problem of refined oil secondary distribution considering unloading sequence constraints

控制与决策. 2020, 35(12): 2999–3005 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1756>

库存水平影响需求下变质品订购、定价和保鲜技术投资的联合决策

Ordering, pricing and preservation technology investment decision for perishable items with inventory-level-dependent demand

控制与决策. 2020, 35(11): 2578–2588 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0195>

允许中转与绕行的众包同城配送司机包裹匹配优化

杨华龙^{1†}, 梁晓萍¹, 王征², 吴琼³

- 大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026;
- 大连海事大学 航运经济与管理学院, 辽宁 大连 116026;
- 顺丰科技有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 针对众包同城配送司机与包裹匹配的问题, 提出一种由零售店作为包裹送取或中转节点、私家车司机顺路捎带的配送策略. 以平台总收益最大化为目标, 构建允许中转和绕行的众包同城配送司机与包裹匹配问题的混合整数规划模型, 并设计改进的自适应大邻域搜索算法进行模型求解; 以大连市主城区为实际场景的数值算例验证模型和算法的有效性和适用性. 研究表明, 允许私家车司机绕行和包裹中转的众包同城配送能够提高平台的总收益, 使得私家车司机和零售店从中获利, 有助于缓解城市道路拥堵、减少环境污染. 敏感性分析结果显示, 增加签约私家车数量以及在一定范围内增大车辆最大绕行系数有助于提高司机-包裹匹配成功率和平台总收益. 随着包裹配送时间紧迫性的减弱, 私家车司机和零售店参与的众包同城配送优势愈加明显.

关键词: 众包同城配送; 司机包裹匹配; 中转; 绕行; 混合整数规划模型

中图分类号: C935

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0687

引用格式: 杨华龙, 梁晓萍, 王征, 等. 允许中转与绕行的众包同城配送司机包裹匹配优化[J]. 控制与决策, 2024, 39(3): 1021-1029.

Optimization of driver-parcel matching for crowdsourced intra-city delivery with multi-hop and detour

YANG Hua-long^{1†}, LIANG Xiao-ping¹, WANG Zheng², WU Qiong³

- Transportation Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
- Shipping Economics & Management College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
- SF Technology Co., LTD, Shenzhen 518000, China)

Abstract: This paper examines the problem of driver-parcel matching for crowdsourced intra-city delivery. A delivery strategy is proposed in which retail stores are served as parcels pickup or multi-hop nodes and private car drivers drop by the way. The problem of crowdsourced parcel intra-city delivery with multi-hop and detour is formulated as a mixed integer programming (MIP) model, where the total revenue of platform is maximized. An improved adaptive large neighborhood search (ALNS) algorithm is developed to solve the model. A numerical example taking the main urban area of Dalian as an actual scenario verifies the effectiveness and applicability of the model and algorithm. The research indicates that the crowdsourced parcel intra-city delivery with multi-hop and detour can increase the total revenue of the platform, and benefit both private car drivers and retail stores. In addition, it also helps to alleviate urban road congestion and reduce environmental pollution. Sensitivity analysis results show that increasing the number of contracted private car drivers and the maximum detour coefficient within a certain range can help improve the success rate of driver-parcel matching and the total revenue of the platform. Furthermore, as the time urgency for parcel delivery weakens, the advantages of crowdsourced intra-city parcel delivery with the participation of private cars drivers and retail stores become more and more obvious.

Keywords: crowdsourced intra-city delivery; driver-parcel matching; multi-hop; detour; MIP model

0 引言

近年来, 伴随着共享经济、信息技术和同城快递业务的快速发展, 众包同城配送这一新的物流模式应

运而生, PiggyBaggy 包裹快递^[1]、达达快送^[2]、京东到家^[3]等平台相继兴起. 与传统同城配送问题不同的是, 众包同城配送问题含有中转、绕行、路线和时间匹

收稿日期: 2022-04-24; 录用日期: 2022-12-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(72071024, 71971036).

责任编委: 霍宝锋.

[†]通讯作者. E-mail: hlyang@dlnu.edu.cn.

*本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

配等约束,增加了问题的复杂性.因此,面对大量的包裹同城配送需求,平台如何高效地集结众包参与者,协调参与者的配送计划,以便减少配送资源投入,已成为业界和学术界的重点.

从车辆路径和调度角度分析,众包同城配送问题既具有带时间窗约束的取送货问题特征^[4],又兼有乘车共享问题^[5]和最后1 km配送问题特点^[6].国内外学者针对众包同城配送问题开展了许多有益研究.Li等^[7]假定所有配送需求信息均已知,研究了静态同城配送司机包裹匹配问题,但是,考虑到大多数包裹配送请求均具有动态到达的特征,司机包裹匹配的灵活性将直接影响配送效率和效益,因此,需要在短时间内匹配司机与包裹.为此,学者们提出了同城包裹配送请求动态插入^[8]、分周期决策^[9]、滚动优化^[10]等解决方案.但是,上述文献均专注于提供直达配送服务,忽视了更为灵活的中转配送方案.

考虑到骑自行车者和行人接近客户,Kafle等^[11]设计了众包模式下的包裹中转配送系统,即由骑自行车者或行人完成包裹第1程取货以及最后1 km配送工作,再用汽车在指定地点进行包裹中转运输.Chen等^[12]使用私家车配送包裹,采用私家车司机面对面交接的方式中转包裹,对于提前到来的司机必须等待衔接司机到达后才能离开,等待时间内平台需向等待司机提供费用补贴,但是,此种交接方式易造成平台的成本损失以及等待司机的时间浪费.Macrina等^[13]研究了带时间窗和中转点的众包配送问题,但是,1个众包司机只能服务1个客户.Masson等^[14]建立了城市双层混合运输系统,其中公共汽车为1级运输,城市货运车队为2级运输,即将公共汽车站作为中转点,首先利用公交车额外的装载能力将货物转移给城市货运车队,然后由城市货运车队将货物运送至目的地.Yu等^[15]采用专车与众包车辆混合配送模式,降低了最后1 km配送成本,但是,其模型不适用于本文多取货点的同城配送问题.

综上所述,目前国内外学者已对众包同城配送问题展开了诸多研究,对本文有重要的借鉴意义,但是仍然存在局限性:1)现有研究大多为将出租车或公交车停靠点作为包裹中转点,虽然便于车辆停靠,但是,在一定程度上给乘客带来不便,也不适于拥有更多社会闲置运力资源的私家车司机参与包裹配送;2)现有研究大多尚未考虑车辆绕行配送,但是在实际中,空闲私家车司机配送包裹时能够接受一定程度的绕行;3)现有研究通常简化了现实中道路网络的复杂度,使得多车辆多包裹间的匹配适合度不够精

准.

在城市中,零售店(包括便利店或小型超市)通常位于客户生活或工作区附近.由于其具有位置分布广泛、营业时间长和包裹存储安全性高等特点^[16],将零售店作为包裹送取和中转节点,不仅方便客户送取包裹,还能吸引潜在客户.此外,随着我国私家车的普及,私家车司机的居住地和工作单位分布广泛,其上下班行程基本覆盖了整个城市路网,且私家车通常均有充足闲置的装载空间将包裹由起始点捎带至目的地.鉴于此,本文借鉴现有网约车和包裹自提网点取货模式,提出一种由零售店作为包裹送取或中转节点、私家车司机顺路捎带的配送策略,对于允许中转和绕行的众包同城配送司机与包裹匹配问题展开深入的研究.该问题存在若干特征,如私家车与包裹匹配方式多样、私家车经过多个节点且允许绕行、包裹与私家车的路线匹配、包裹与私家车的匹配等,增加问题的复杂性和挑战性,无法依赖任何现有研究.本文的主要内容如下.

1) 提出一个由零售店作为包裹送取或中转节点、私家车司机顺路捎带的配送策略,构建允许中转和绕行的众包同城配送司机与包裹匹配优化模型.有利于提高包裹同城配送的效率和效益,有益于减少城市交通增量和环境污染.

2) 基于问题以及模型的特点,设计改进的自适应大邻域搜索算法,引入包裹时间紧迫性参数,设立私家车司机与包裹(经由零售店)直达或中转配送的匹配规则,提高计算效率和匹配成功率,为提高众包平台效益提供有益的方法.

3) 选取大连主城区实际复杂道路网络为算例场景,进行大规模数据集(每日决策期内私家车数量为1500辆、产生1000~3000件包裹)算例测试,体现所提出方法良好的问题处理能力,推进众包同城配送在快递行业中的实际应用.

1 问题描述

假设某快递企业通过与私家车司机和零售店主签署众包协议,搭建一个同城配送平台.平台随时接收客户同城包裹的配送请求.通过将决策周期划分为若干个长度相同的时段,平台在每个时段末将满足包裹配送服务要求的私家车司机与包裹进行匹配,即利用私家车将包裹从其始发地零售店配送至中转地或目的地零售店.当私家车司机与包裹匹配失败时,平台需安排专车配送包裹,以便在满足客户包裹配送服务要求的前提下,最大化平台自身总收益.

为了更好地匹配司机与包裹,平台在一定的范围

内允许私家车绕行并给予一定的补偿,包裹可由1位司机从其出发地零售店直接运送至目的地零售店,也可在零售店中转后,指派其他司机完成运送.由于Hong等^[7]发现同城配送任务大多可由1或2辆众包车辆完成,且多次中转、装卸包裹易造成包裹损失,本文假设包裹只能被中转1次.由此,可构造私家车司机与包裹的直达、中转、绕行直达和绕行中转4种匹配方式:在直达方式下,始发地在零售店附近的私家车,将包裹由零售店直达配送至车辆目的地附近的零售店;在中转方式下,私家车先将包裹由起始零售店配送至中转零售店,再由另一辆私家车将其中转配送至目的地零售店;在绕行直达方式下,存在3种可能的情形:直达-绕行、绕行-配送和绕行-配送-绕行;在绕行中转方式下,私家车完成包裹中转配送,在此过程中允许私家车绕行.

由此可见,在满足包裹和私家车路线、时间窗等约束下,平台可设计出直达、中转、绕行直达和绕行中转等多种司机与包裹匹配方案.对于与私家车司机匹配不成功的包裹,平台则需要安排专车完成配送.因此,允许中转和绕行的众包同城配送司机与包裹匹配问题优化的实质为,在满足包裹配送路线、时间等要求的前提下,平台在决策周期内各时段末,通过合理安排符合要求的私家车司机到各零售店直达或中转配送包裹,实现决策期内平台收益最大化.为了简化模型,本文做出以下假设.

- 1) 零售店空间充足;
- 2) 包裹装卸时间为0,当装载包裹的车辆到达预定零售店时,将包裹放下后便可离开;
- 3) 城市道路交通状态稳定,车辆行驶速度不变.

2 模型构建

2.1 参数和变量

1) 集合.

N : 节点(私家车起止点、包裹起止点,中转点)集合, $i \in N$;

K : 私家车集合, $k \in K$;

T : 时段集合, $t \in T$;

P_t : 在时段 t 内生成的包裹集合, $t \in T, p \in P_t$.

2) 参数.

O_k : 私家车 k 的起点;

D_k : 私家车 k 的终点;

O_{tp} : 时段 t 内生成包裹 p 的起点;

D_{tp} : 时段 t 内生成包裹 p 的终点;

E_{O_k} : 私家车 k 在起点的最早出发时间;

L_{D_k} : 私家车 k 在终点的最迟到达时间;

$E_{O_{tp}}$: t 内包裹 p 在起点的最早配送时间;

$L_{D_{tp}}$: t 内包裹 p 在终点的最迟到达时间;

E_{tki} : t 内私家车 k 在节点 i 的最早出发时间;

L_{tki} : t 内私家车 k 在节点 i 的最迟出发时间;

E_{tpi} : t 内包裹 p 在节点 i 的最早配送时间;

L_{tpi} : t 内包裹 p 在节点 i 的最迟配送时间;

S_t : 时段 t 末的车辆行驶速度;

L_{ij} : 节点 i 与 j 间的距离;

A : 私家车运送包裹时,每公里的薪资;

B : 私家车绕行 1 km 的补偿;

C : 零售店存储 1 件包裹的费用;

D : 使用专车配送包裹的成本均值;

C_{pt} : 时段 t 内包裹 p 的配送收入;

R_k : 私家车 k 从起点至终点的最短距离;

R_{tp} : t 内包裹 p 从起点至终点的最短距离;

θ : 私家车最大绕行系数;

V_k : 车辆 k 的闲置容量;

V_{tp} : 时段 t 内包裹 p 的体积;

Q_t : 时段 t 内生成包裹的总数量.

3) 变量.

b_{tki} : 在 t 时段内私家车 k 离开节点 i 的时间;

a_{tki} : 在 t 时段内私家车 k 到达节点 i 的时间;

b_{tpi} : 时段 t 内包裹 p 离开节点 i 的时间;

a_{tpi} : 时段 t 内包裹 p 到达节点 i 的时间;

w_{kij} : 0-1 变量,当车辆 k 由节点 i 至节点 j 则为 1, 否则为 0;

x_{tpkij} : 0-1 变量,当车辆 k 将时段 t 内包裹 p 从节点 i 送至节点 j 则为 1, 否则为 0;

y_{tp} : 0-1 变量,当时段 t 内包裹 p 由专车配送则为 1, 否则为 0.

2.2 配送费用函数

在包裹同城配送中,平台按“递远递减”原则向客户收取包裹配送费用,如闪送、达达、UU跑腿等平台均采用此种收费模式.即在时段 t 内包裹 p 的配送费用函数 C_{tp} 为

$$C_{tp} = \begin{cases} C_0, & 0 < R_{tp} \leq \mu_1, t \in T; \\ C_0 + \alpha_1(R_{tp} - \mu_1), & \mu_1 < R_{tp} \leq \mu_2, t \in T; \\ C_0 + \alpha_1(\mu_2 - \mu_1) + 0.5\alpha_2(R_{tp} - \mu_2), & R_{tp} > \mu_2, t \in T. \end{cases} \quad (1)$$

其中: C_0 为送 1 件包裹的基础费用; α_1 为包裹的路径长度超出 μ_1 km 后,距离每增加 1 km,客户需额外支付的费用; α_2 为包裹路径长度超出 μ_2 km 后,距离每

增加2 km,客户需额外支付的费用.

2.3 私家车和包裹节点时间窗

当某时段末平台无法找到(匹配)合适私家车司机完成包裹的直达配送时,平台可考虑安排私家车司机进行包裹(绕行)中转配送.由于私家车司机与包裹在起点和终点均有时间限制,需要在中转节点设置相应的私家车司机和包裹时间窗限制.若平台在时段 t 末司机与包裹匹配成功,则有

$$E_{tki} = E_{O_k} + L_{O_k i} / S_t, \forall t \in T, i \in N \setminus \{O_k\}, \quad (2)$$

$$L_{tki} = L_{D_k} - L_{i D_k} / S_t, \forall t \in T, i \in N \setminus \{D_k\}, \quad (3)$$

$$E_{t p i} = E_{O_{t p}} + L_{O_{t p} i} / S_t, \forall t \in T, i \in N \setminus \{O_{t p}\}, \quad (4)$$

$$L_{t p i} = L_{D_{t p}} - L_{i D_{t p}} / S_t, \forall t \in T, i \in N \setminus \{D_{t p}\}. \quad (5)$$

2.4 数学模型

根据前述分析,建立如下数学模型:

$$\begin{aligned} \max z = & \sum_{t \in T} \sum_{p \in P_t} C_{t p} - D \sum_{t \in T} \sum_{p \in P_t} y_{t p} - \\ & A \sum_{t \in T} \sum_{p \in P_t} \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j \neq i} L_{i j} x_{t p k i j} - \\ & B \sum_{k \in K} \left(\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} L_{i j} w_{k i j} - R_k \right) - \\ & 2C \sum_{t \in T} \sum_{p \in P_t} \sum_{k \in K} x_{t p k O_{t p} D_{t p}} - \\ & 3C \sum_{t \in T} \sum_{p \in P_t} \sum_{k \in K} \sum_{j \in N, j \neq D_{t p}} x_{t p k O_{t p} j}; \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in N} w_{k i j} - \sum_{h \in N} w_{k j h} = 0, \\ \forall k \in K, j \in N \setminus \{O_k, D_k\}; \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{t p k i j} - \sum_{k \in K} \sum_{h \in N} x_{t p k j h} = 0, \\ \forall t \in T, p \in P_t, j \in N \setminus \{O_{t p}, D_{t p}\}; \quad (8) \end{aligned}$$

$$\sum_{i \in N} w_{k i O_k} = 0, \forall k \in K; \quad (9)$$

$$\sum_{j \in N} w_{k D_k j} = 0, \forall k \in K; \quad (10)$$

$$\sum_{j \in N} w_{k O_k j} = 1, \forall k \in K; \quad (11)$$

$$\sum_{i \in N} w_{k i D_k} = 1, \forall k \in K; \quad (12)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{t p k i O_{t p}} = 0, \forall t \in T, p \in P_t; \quad (13)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{t p k D_{t p} j} = 0, \forall t \in T, p \in P_t; \quad (14)$$

$$\sum_{i \in N} w_{k i j} \leq 1, \forall k \in K, j \in N; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} x_{t p k i j} \leq w_{k i j}, \forall t \in T, p \in P_t, k \in K, \\ i, j \in N; \quad (16) \end{aligned}$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} L_{i j} w_{k i j} \leq R_k (1 + \theta), \forall k \in K; \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{t p k O_{t p} j} + y_{t p} = 1, \\ \forall k \in K, t \in T; \quad (18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{t p k i j}, y_{t p}, w_{k i j} \in \{0, 1\}, \forall t \in T, p \in P_t, \\ k \in K, i \in N, j \in N; \quad (19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{t k i} + L_{i j} / S_t - M(1 - w_{k i j}) \leq a_{t k j}, \\ \forall t \in T, k \in K, i \in N \setminus D_k, j \in N \setminus O_k; \quad (20) \end{aligned}$$

$$b_{t k O_k} \geq E_{O_k}, \forall t \in T, k \in K; \quad (21)$$

$$a_{t k D_k} \leq L_{D_k}, \forall t \in T, k \in K; \quad (22)$$

$$\begin{aligned} b_{t p O_{t p}} \geq E_{O_{t p}} (1 - y_{t p}), \forall t \in T, p \in P_t; \\ (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{t p D_{t p}} \leq L_{D_{t p}} (1 - y_{t p}), \forall t \in T, p \in P_t; \\ (24) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{t k i} \geq E_{t k i} \sum_{j \in N} w_{k i j}, \forall t \in T, k \in K, \\ i \in N \setminus \{D_k\}; \quad (25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{t k i} \leq L_{t k i} \sum_{h \in N} w_{k h i}, \forall t \in T, k \in K, \\ i \in N \setminus \{O_k\}; \quad (26) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{t k i} \geq a_{t k i}, \forall t \in T, k \in K, \\ i \in N \setminus \{O_k, D_k\}; \quad (27) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{t p i} \geq a_{t p i}, \forall t \in T, p \in P_t, \\ i \in N \setminus \{O_{t p}, D_{t p}\}; \quad (28) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{t p i} \geq E_{t p i} \sum_{k \in K} \sum_{j \in N, j \neq i} x_{t p k i j}, \\ \forall t \in T, p \in P_t, i \in N \setminus \{D_{t p}\}; \quad (29) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{t p i} \leq L_{t p i} \sum_{k \in K} \sum_{j \in N, j \neq i} x_{t p k j i}, \\ \forall t \in T, p \in P_t, i \in N \setminus \{O_{t p}\}; \quad (30) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -M \left(1 - \sum_{j \in N} x_{t p k j i} \right) \leq a_{t k i} - a_{t p i} \leq \\ M \left(1 - \sum_{j \in N} x_{t p k j i} \right), \forall t \in T, p \in P_t, \\ k \in K, \forall i \in N; \quad (31) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -M \left(1 - \sum_{j \in N} x_{t p k i j} \right) \leq b_{t k i} - b_{t p i} \leq \end{aligned}$$

$$M\left(1 - \sum_{j \in N} x_{tpkij}\right), \forall t \in T, p \in P_t, \\ k \in K, \forall i \in N; \quad (32)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{p \in P_t} x_{tpkij} V_{tp} \leq V_k, \forall k \in K, i \in N, \\ j \in N; \quad (33)$$

$$b_{tpi}, a_{tpi}, b_{tki}, a_{tki} \geq 0, \forall t \in T, k \in K, \\ p \in P_t, i \in N. \quad (34)$$

其中:式(6)为最大化平台收益,包含平台的包裹配送收入、支付私家车司机的薪酬、对车辆绕行距离给予的补偿、直达配送包裹时平台对实体店的补偿、中转包裹时平台对实体店的补偿、私家车司机与包裹匹配不成功时平台安排专车配送包裹产生的费用;式(7)确保每辆私家车路线连续;式(8)确保每件包裹(中转或直达)路线连续;式(9)保证车辆访问的方向均为单向,没有司机返回起点;式(10)为私家车到达终点后不会离开;式(11)为每辆私家车均从起点出发;式(12)为每辆私家车必须到达相应终点;式(13)确保没有包裹返回起点;式(14)确保包裹到达终点后不会离开;式(15)为每个节点同一司机最多访问1次;式(16)确保包裹只能分配给经过其配送路线的车辆;式(17)为车辆绕行距离约束,任何超过最大绕行距离的送取包裹均是不被允许的;式(18)为每个包裹均必须由私家车或专车配送;式(19)为变量非负约束;式(20)为根据私家车出发时间计算到达时间;式(21)~(30)为时间约束,表示司机需在最早出发时间后才能出发,在最晚到达时间前必须到达,显然司机的出发时间也不得早于到达时间,类似地约束包裹出发及到达时间;式(31)和(32)保证每件包裹与携带它的私家车时间保持一致,即包裹的出发时间等于携带包裹的私家车的出发时间,包裹的到达时间等于运送包裹的私家车的到达时间;式(33)为车辆容量约束,所装载的包裹体积不能超过车内容量;式(34)为决策变量约束。

3 算法设计

众包同城配送问题属于带时间窗的装卸一体化问题(PDPTW)的变体,是典型NP-hard问题^[18]。不同于常规的PDPTW问题中送取服务只有起止点约束,本文还有中转约束,且允许车辆绕行,导致车辆经过多个节点,进一步增加了问题求解的复杂性。本文首先使用贪婪算法生成初始方案;然后,使用改进的ALNS算法对初始方案迭代优化,利用算子间的相互竞争生成多样化的邻域结构^[19],在扩大搜索范围的

同时有效引导算法找寻更优解。

3.1 贪婪算法生成初始解

贪婪算法根据某个优化测度逐步获得局部最优解。本文贪婪算法获取初始解的思路是,首先生成车辆路径,然后在满足时间窗、容量等约束的基础上,将包裹逐个分配给利润最高的车辆,直至包裹序列清0为止,输出初始解。具体步骤如下。

step 1: 生成司机 k 与时段 t 内包裹 p 的路线。参照文献^[20],利用Dijkstra算法规划最短出行路线。

step 2: 计算相关节点时间窗。本文将包裹最晚出发与最晚到达时间的差值定义为包裹灵活时间 Δp ,最晚到达时间与最晚出发时间的差值为包裹最短配送时间,将灵活时间 Δp 与包裹最短路长度 R_{tp} 的比值 η 定义为包裹时间紧迫性,其中 $\eta = \Delta p / R_{tp}$ 。 η 值越小,表明包裹时间紧迫性越强,越需要优先服务。按照时间紧迫性生成包裹序列。

step 3: 包裹指派。依次检查车辆与包裹路线、时间窗的兼容性以及车辆闲置空间约束,在满足约束的备选车辆中,将包裹指派给利润最高的车辆,更新该车辆在相关节点的时间窗口和容量信息。

step 4: 若没有满足约束的私家车,包裹指派失败,则平台安排专车进行配送,从待分配包裹序列中删除该包裹,更新包裹序列。

step 5: 返回至step 2直至包裹序列清0,输出初始解。

3.2 改进的ALNS算法

在ALNS算法中,通常采用“若新解优于当前解,则接受新解,若新解劣于当前解,则舍弃新解”的准则,这会导致算法易陷入局部最优^[21]。为此,本文对ALNS算法接受准则加以调整,设计改进的ALNS算法,以便更好地获得优化解。改进的ALNS算法求解过程如下。

1) 算子权重设计。本文将 S 次迭代设为一个周期,在每个周期内,设置 H_1 个移除算子和 H_2 个修复算子。每个迭代周期开始时,各算子初始权重均为1。

2) 移除算子。移除包裹的数量为成功匹配包裹数量的 $\alpha\%$;①随机移除算子,随机选择包裹从匹配方案中移除;②最差移除算子,移除对目标函数影响最大的前 $\alpha\%$ 包裹;③相似度移除算子,随机选择1件包裹移除,然后移除与此包裹相似度最大的包裹,直至包裹移除数量达到 $\alpha\%$ 。下式为2件包裹相似度函数 $R(p, p')$, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为权重系数:

$$R(p, p') = \beta_1 \frac{|N_p \cap N_{p'}|}{\min\{|N_p|, |N_{p'}|\}} - \beta_2 (|E_{tp} - E_{tp'}| +$$

$$|L_{tp} - L_{tp'}| + \beta_3 \frac{\min\{V_{tp}, V_{tp'}\}}{\max\{V_{tp}, V_{tp'}\}}. \quad (35)$$

3) 修复算子. ① 贪婪修复算子, 平台将移除的包裹按照移除顺序排序, 未匹配成功的包裹随机排列在移除包裹序列后, 重新指派上述包裹, 其指派顺序和匹配原则与第3.1节相同; ② 后悔值修复算子, 在对移除以及未匹配成功(统称为待修复)的包裹进行重新指派时, 后悔值修复算子的包裹指派步骤如下.

step 1: 计算待修复包裹 p ($p \in P^r$) 指派给私家车 k ($k \in \{1, 2, \dots, K_p\}$) 时的成本值 C_{kp} , P^r 为待修复包裹集合. 若包裹 p 已被指派, 则 P^r 更新为 $P^r \setminus \{p\}$, K_p 为满足包裹 p 约束的车辆数, 找出最低 $C_{\Delta p}$.

step 2: 计算出各成本值与最低成本值的差值和 $\sum_{k=1}^{K_p} (C_{kp} - C_{\Delta p})$, 按照下式选出重新指派的包裹, 按照第3.1节匹配原则对包裹 p' 进行指派:

$$p' = \arg \max_{p \in P^r} \left(\sum_{k=1}^{K_p} C_{kp} - C_{\Delta p} \right). \quad (36)$$

step 3: 返回至 step 1, 直至 P^r 为空集.

4) 接受准则. 本文通过引入模拟退火机制, 每次迭代时, 将新解与当前解进行比较, 若新解优于当前解, 则接受新解; 若新解劣于当前解, 则以概率 $e^{-(Z(s') - Z(s))/T}$ 接受劣解. 其中: $Z(s')$ 为新解 s' 对应的收益, $Z(s)$ 为当前解 s 对应的收益. $T_n = C \cdot T_{n-1}$. 其中: T_n 为当前第 n 次迭代温度, C 为冷却系数.

5) 权重更新. 新解为全局最优解, 算子加 σ_1 分; 新解优于当前解, 算子加 σ_2 分; 新解劣于当前解, 但是被接受时, 对应算子加 σ_3 分, 其中 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$. 在迭代周期末, 根据此周期算子 i 累计得分 F_i 更新权重. 算子 i 在迭代周期末的新权重为 $W'_i = \rho N_i / F_i + (1 -$

$\rho) W_i$, N_i 为算子 i 在一次迭代中总计被移除或修复的次数, ρ 为常数 ($0 < \rho < 1$).

6) 终止条件. 迭代次数为 U 时, 算法结束.

4 算例分析

4.1 小规模算例

本节选取 Solomon 算例库中 R 101 的部分节点作为零售店, 生成一个 15 个节点的空间分布网络. 包裹数量分别为 20、25、30、35 和 40 件, 构造 5 组小规模算例. 私家车的数量为 40, 车辆的容量服从均匀分布 [5, 10] 单位, 包裹体积服从均匀分布 [1, 4] 单位, 车辆和包裹的最早出发时间均匀分布于上午 [7, 8] 时, 车辆的最迟到达时间为最早出发时间、行驶时间及其行驶时间松弛量 (60 min) 之和; 包裹的最晚到达时间为最早配送时间、运输时间与包裹配送时间松弛量 (60 min) 之和. 平台使用专车配送的成本均值为 20 元/件, 客户发布包裹配送请求提前时间为 15 min, 车辆行驶速度均取值为 30 km/h, 车辆燃油价格为 7.5 元/L, 平台给予私家车司机的薪资为 1.2 元/km, 绕行补偿为 3 元/km, 最大绕行系数为 16%, 零售店存储包裹的费用为 0.5 元/件, 包裹的基础配送费用为 12 元/件, 配送路径长度超出 2 km 后, 配送费用为 2 元/(件·km), 超出 12 km 后, 配送费用为每 2 km 3 元/件.

本文测试在一个内存为 16 GB, 3.2 GHz 的英特尔酷睿 i7 处理器上进行. 算法有关参数为 $U = 1000$, $S = 100$, $\alpha = 3$, $C = 0.999$, $T_0 = 1500$, $\rho = 0.7$, $\sigma_1 = 10$, $\sigma_2 = 5$, $\sigma_3 = 2$, $T_{\max} = 30$ min. 将所提出算法与 LINGO 可行解 (最长运行时间为 3 600 s) 以及 LNS 算法对比, 计算结果如表 1 所示.

表 1 不同包裹数量下的算法性能对比

算例	包裹数量	LINGO		LNS		本文算法		优化比例	
		总收益/元	运行时间/s	总收益/元	运行时间/s	总收益/元	运行时间/s	Gap ₁ / %	Gap ₂ / %
1	20	468.06	3 600	468.06	0.588	468.06	0.596	0.00	0.00
2	25	576.49	3 600	576.49	0.598	576.49	0.616	0.00	0.00
3	30	670.31	3 600	661.29	0.606	667.49	0.634	-0.42	0.94
4	35	749.59	3 600	743.45	0.615	747.33	0.640	-0.30	0.52
5	40	848.79	3 600	840.99	0.630	844.95	0.644	-0.45	0.47

注: Gap₁、Gap₂ 分别为本文算法与 LINGO、LNS 算法相比, 收益的优化比例.

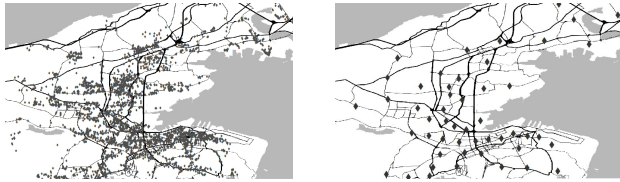
由表 1 可见, 所提出算法得到的总收益小于 LINGO 的结果, 但是在 5 组算例中, 两者相差均不超过 0.45%, 且所提出算法的运行时间远小于 LINGO, 能够迅速得到配送方案; 对比 LNS 与所提出算法, 虽然二者在运算时间上相差不大, 但是, 所提出算法得到的总收益均不低于 LNS 算法的结果. 究其原因, 是

LNS 算法只通过规定的删除算子和修复算子改进解, 忽略了合理选择算子的重要性. 而所提出算法根据算子的历史表现选择下一次迭代使用的算子, 在增加邻域搜索范围的同时, 也加快该算法的求解速度. 进一步地, 本文通过引入模拟退火算法机制对 LNS 算法加以改进, 避免了搜索过程陷入局部最优解, 使得

所提出算法更易找到更优解,从而提升解的质量。

4.2 大连市实际道路网络算例

本文利用百度地图API抓取大连市4个主要城区内3568家零售店的地理位置信息作为实验的基础数据,如图1(a)所示。使用k-means聚类方法对这些零售店进行聚类,生成的50个零售店作为包裹起止



(a) 原始状态 (b) 聚类后状态

图1 大连道路网络以及零售店位置分布

和中转节点,如图1(b)所示。

假设某快递企业与上述50家零售店主以及众多私家车司机签署众包协议,在大连搭建了一个众包同城配送平台,零售店间具体距离由高德地图导航的最短路线求得。本文按均匀分布[1000,3000]件随机生成一周30个工作日的包裹数据,并设定平台决策期内可利用的私家车数量为1500辆,平台决策时段间隔为10min,其他参数与第4.1节相同,由此共形成30组算例数据,将本文众包模式与“1对1”专车包裹直达配送(简称“1对1”)模式^[22]进行比较。得到的结果均值如表2所示。在“1对1”模式中,平台将80%的包裹配送收入支付给专车,仅抽取20%的包裹配送收入作为营收^[23]。

表2 算例测试结果对比

模式	平台 总收益/元	私家车 总收益/元	专车 总收益/元	零售店 总收益/元	配送 总距离/km	专车 配送距离/km	私家车 绕行距离/km	城市交通 增量距离/km	碳排放 估值/kg
本文众包	31453	25774	2429	2031	23145	1740	48	1788	411
“1对1”	12337	—	49350	—	23097	23097	—	23097	5312

注:普通燃油车每公里碳排放量为0.23 kg^[24]。

由表2可见,与“1对1”模式相比,所提出众包模式不仅大大提高了平台的总收益,也使得私家车和零售店获得了额外的收益,但是专车总收益大幅降低。究其原因,是在所提出众包模式下,平台充分利用了(顺路)私家车和零售店(空闲场地)等社会闲置配送资源,减少了使用“1对1”配送包裹的专车数量,从而在有效地减少了专车资源使用的同时,也大幅降低了包裹配送成本,并有效实现了平台、私家车和零售店3方的合作共赢。此外,在本文众包模式下,尽管配送车辆行驶总距离较高,但是,大幅减少了城市交通增量和车辆碳排放估值。结果表明,使用所提出众包模式配送对于缓解城市道路拥堵、减少环境污染均具有重要的现实意义。

4.3 敏感性分析

本文以上述第4.2节大连实际复杂道路网络为背景,对签约私家车司机数量、车辆最大绕行系数和

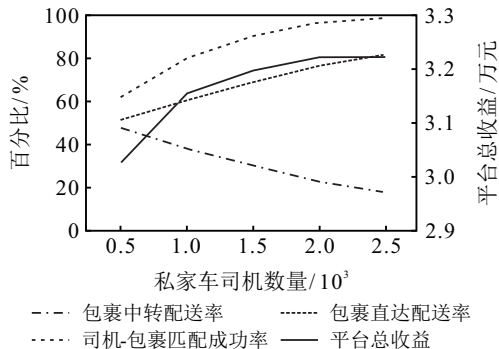


图2 私家车数量敏感性分析结果

包裹配送时间松弛量3项参数进行敏感性分析。本文将包裹数量设为2000件,在其他参数保持不变的情况下,按私家车司机数量取值范围由500~2500辆递增构造5组算例,得到的敏感性分析结果如图2所示。

由图2可见,随着私家车司机数量的增加,司机-包裹匹配成功率、包裹直达配送率、平台总收益均随之增加,包裹中转配送率随之降低。这是因为当签约私家车司机数量较少时,部分包裹难以匹配到合适的私家车。私家车司机数量的增加直接导致了私家车出行路线及其时间窗的多样化,使得包裹更易匹配到合适私家车,专车配送的包裹减少。平台会将包裹优先分配给能够直达配送的私家车司机,提高了司机-包裹匹配成功率、包裹直达配送率,降低了包裹中转配送率,并在减少车辆绕行成本、包裹存储成本和专车配送成本的同时,提高了平台的总收益。

按车辆最大绕行系数取值范围由0~20%递增构造6组算例,得到的敏感性分析结果如图3所示。

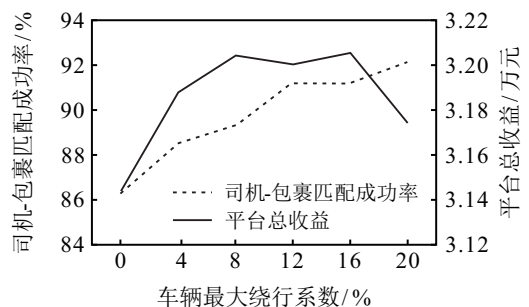


图3 绕行系数敏感性分析结果

由图3可见,随着车辆最大绕行系数的增大,司机-包裹匹配成功率随之增加.这是因为随着绕行系数的增大,可选择的司机包裹匹配路线增多,使得部分原来无法配送的包裹可找到合适的私家车司机进行配送,从而提高了司机-包裹匹配成功率.当车辆最大绕行系数由0增加至16%时,平台总收益会随之增加,但是,当车辆最大绕行系数超过16%后,平台总收益会随之降低.究其原因,是当车辆最大绕行系数在较低范围内增加时,司机-包裹匹配成功率的增加会减少专车配送量和配送成本,提高了平台总收益;但是,当绕行系数在较高范围内增加时,车辆绕行距离以及产生的成本增加更为明显,因而会导致总成本的增加,使得平台总收益降低.

按包裹配送时间松弛量取值范围由30~90 min递增构造5组算例,得到的敏感性分析结果如图4所示.

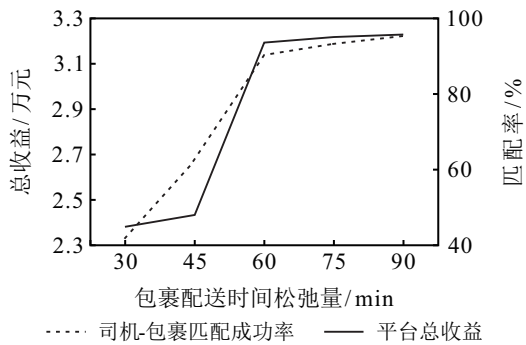


图4 包裹松弛时间敏感性分析结果

由图4可见,随着包裹时间松弛量的增大,即随着客户对包裹配送时间紧迫性要求的减弱,司机-包裹匹配成功率和平台总收益均呈上升趋势.这是由于当包裹配送时间松弛量处于较低水平时,包裹配送紧迫性较强,能够满足时间要求的私家车司机较少,平台使用专车配送模式的包裹较多,司机-包裹匹配成功率和平台总收益明显偏低.但是,随着包裹配送时间松弛量的增加,越来越多的私家车司机能够在规定的时间内将包裹配送至目的地,提高了司机-包裹匹配成功率,使用专车配送模式的包裹减少,从而节约了运营成本,提高了平台总收益,使得私家车司机和零售店参与的众包同城配送优势愈加明显.

5 结论

如何高效地集结和选择合适的众包参与者,完成包裹同城配送请求,是实施众包配送的关键所在.为了有效利用城市现有配送资源以解决同城包裹配送问题,本文提出了将零售店作为包裹送取和中转节点、私家车司机顺路捎带的配送策略,构建了允许中转和绕行的众包同城配送司机包裹匹配模型和算法,

为众包同城配送提供了一种新的方法.

本文得到以下结论:1)所提出方法能够在较短时间内响应客户要求并完成包裹配送任务,比现有城市快递服务更具优势,且平台、私家车司机和零售店各方均能够从中获利;2)私家车司机以顺路捎带方式参与包裹同城配送,可减少快递车辆的使用,提高了包裹同城配送解决方案的环境友好性和可持续性;3)选择居民生活区和工作区附近的零售店作为包裹取送或中转节点,不仅能够提高零售店的效益,便于包裹和私家车司机的动态对接和匹配,还能省去物流存储设施的建设和维护成本.

本文的管理启示如下:1)平台应积极与私家车司机签约,充分利用私家车资源来优化包裹同城配送服务;2)平台应根据市场需求选取合理位置的零售店作为包裹送取和中转节点,便于私家车司机和客户送取包裹,提高平台、私家车司机和零售店各方的收益;3)当签约私家车司机数量不足时,平台可在适当范围内提高车辆最大绕行系数,以增加司机-包裹匹配成功率和平台总收益,但是该系数不宜过大,以免对平台总收益产生不利的影响.

本文研究了车辆行驶速度恒定下众包同城配送司机与包裹匹配的问题.在实际中,城市道路经常发生交通拥堵,导致在不同时段或区域内车辆行驶速度发生改变,进而会对司机与包裹匹配优化方案的制定产生影响.因此,未来可进一步研究城市时变路网下众包同城配送司机与包裹匹配的问题.

参考文献(References)

- [1] Paloheimo H, Lettenmeier M, Waris H. Transport reduction by crowdsourced deliveries — A library case in Finland[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 132: 240-251.
- [2] 宾厚,王欢芳,谢国杰.分享经济下企业实施众包物流的影响因素研究[J].*管理评论*, 2019, 31(8): 219-229. (Bin H, Wang H F, Xie G J. Study on the influencing factors of crowdsourcing logistics under sharing economy[J]. *Management Review*, 2019, 31(8): 219-229.)
- [3] 孟秀丽,吴一凡,刘波.考虑延误险的多期众包物流服务质量优化[EB/OL]. (2022-06-29)[2022-09-29]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.1807>. (Meng X L, Wu Y F, Liu B. Multi-period crowd sourcing logistics service quality optimization considering delay insurance[EB/OL]. (2022-06-29)[2022-09-29]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.1807>.)
- [4] Ahamed T, Zou B, Farazi N P, et al. Deep reinforcement learning for crowdsourced urban delivery[J].

- Transportation Research—Part B: Methodological, 2021, 152: 227-257.
- [5] Arslan A M, Agatz N, Kroon L, et al. Crowdsourced delivery-dynamic pickup and delivery problem with ad hoc drivers[J]. Transportation Science, 2019, 53(1): 222-235.
- [6] Xiao F, Wang H, Guo S, et al. Efficient and truthful multi-attribute auctions for crowdsourced delivery[J]. International Journal of Production Economics, 2021, 240: 108233.
- [7] Li B X, Krushinsky D, Reijers H A, et al. The share-a-ride problem: People and parcels sharing taxis[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 238(1): 31-40.
- [8] Liu Y, Guo B, Chen C, et al. FooDNet: Toward an optimized food delivery network based on spatial crowdsourcing[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 18(6): 1288-1301.
- [9] Do P T, Nghiem N V D, Nguyen N Q, et al. A time-dependent model with speed windows for share-a-ride problems: A case study for Tokyo transportation[J]. Data & Knowledge Engineering, 2018, 114: 67-85.
- [10] Cheng G Y, Guo D K, Shi J M, et al. Planning city-wide package distribution schemes using crowdsourced public transportation systems[J]. IEEE Access, 2018, 7: 1234-1246.
- [11] Kafle N, Zou B, Lin J. Design and modeling of a crowdsource-enabled system for urban parcel relay and delivery[J]. Transportation Research—Part B: Methodological, 2017, 99: 62-82.
- [12] Chen W Y, Mes M, Schutten M. Multi-hop driver-parcel matching problem with time windows[J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2018, 30(3): 517-553.
- [13] Macrina G, Di P P L, Guerriero F, et al. Crowd-shipping with time windows and transshipment nodes[J]. Computers & Operations Research, 2020, 113: 1-15.
- [14] Masson R, Trentini A, Lehuédé F, et al. Optimization of a city logistics transportation system with mixed passengers and goods[J]. EURO Journal on Transportation and Logistics, 2017, 6(1): 81-109.
- [15] Yu V F, Jodiawan P, Redi A A N P. Crowd-shipping problem with time windows, transshipment nodes, and delivery options[J]. Transportation Research—Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 157: 1-35.
- [16] Chen C, Pan S L, Wang Z, et al. Using taxis to collect citywide e-commerce reverse flows: A crowdsourcing solution[J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(7): 1833-1844.
- [17] Hong H T, Li X, He D Q, et al. Crowdsourcing incentives for multi-hop urban parcel delivery network[J]. IEEE Access, 2019, 7: 26268-26277.
- [18] 任腾, 罗天羽, 谷智华, 等. 考虑同时取送货的城市物流共同配送路径优化[EB/OL]. (2022-03-17)[2022-09-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220316.1739.007.html>.
- (Ren T, Luo T Y, Gu Z H, et al. Optimization of urban logistics co-distribution path considering simultaneous pickup and delivery[EB/OL]. (2022-03-17)[2022-09-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220316.1739.007.html>.)
- [19] 伍国华, 毛妮, 徐彬杰, 等. 基于自适应大规模邻域搜索算法的多车辆与多无人机协同配送方法[J]. 控制与决策, 2023, 38(1): 201-210.
- (Wu G H, Mao N, Xu B J, et al. The cooperative delivery of multiple vehicles and multiple drones based on adaptive large neighborhood search[J]. Control and Decision, 2023, 38(1): 201-210.)
- [20] 卿东升, 邓巧玲, 李建军, 等. 基于粒子群算法的满载需求可拆分车辆路径规划[J]. 控制与决策, 2021, 36(6): 1397-1406.
- (Qing D S, Deng Q L, Li J J, et al. Split vehicle route planning with full load demand based on particle swarm optimization[J]. Control and Decision, 2021, 36(6): 1397-1406.)
- [21] 李桃迎, 吕晓宁, 李峰, 等. 考虑动态需求的外卖配送路径优化模型及算法[J]. 控制与决策, 2019, 34(2): 406-413.
- (Li T Y, Lv X N, Li F, et al. Routing optimization model and algorithm for takeout distribution with multiple fuzzy variables under dynamics demand[J]. Control and Decision, 2019, 34(2): 406-413.)
- [22] 慕静, 杜田玉, 刘爽, 等. 基于即时配送和收益激励的众包物流运力调度研究[J]. 运筹与管理, 2018, 27(5): 58-65.
- (Mu J, Du T Y, Liu S, et al. Research on crowdsourcing logistics capacity scheduling based on instant distribution and revenue incentives[J]. Operations Research and Management Science, 2018, 27(5): 58-65.)
- [23] 搜狐. 闪送C+轮融资5000万美元, 半年融资达一亿美金|钛快讯[EB/OL]. (2017-06-05)[2022-04-01]. https://www.sohu.com/a/146170541_116132.
- (SOHU. Flash C+ round completed \$5000 financing, and the financing reached \$100 million in half a year[TMTPost[EB/OL]. (2017-06-05)[2022-04-01]. https://www.sohu.com/a/146170541_116132.)
- [24] Hien N L H, Kor A. Analysis and prediction model of fuel consumption and carbon dioxide emissions of light-duty vehicles[J]. Applied Sciences, 2022, 12(2): 803.

作者简介

杨华龙(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流与供应链管理研究, E-mail: hlyang@dlmu.edu.cn;

梁晓萍(1995—), 女, 博士生, 从事物流配送优化的研究, E-mail: 1053448596@qq.com;

王征(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电子商务与物流管理研究, E-mail: drwz@dlut.edu.cn;

吴琼(1996—), 女, 硕士生, 从事物流配送管理的研究, E-mail: 891769285@qq.com.