

# 时间依赖型绿色车辆路径模型及改进蚁群算法<sup>①</sup>

周鲜成<sup>1,2</sup>, 刘长石<sup>1,3\*</sup>, 周开军<sup>1,2</sup>, 贺彩虹<sup>4</sup>, 黄兴斌<sup>1,2</sup>

(1. 湖南商学院湖南省移动电子商务协同创新中心, 长沙 410205; 2. 湖南商学院移动商务智能湖南省重点实验室, 长沙 410205; 3. 湖南商学院工商管理学院, 长沙 410205; 4. 湖南商学院会计学院, 长沙 410205)

**摘要:** 绿色车辆路径规划对物流配送领域的节能减排具有重要的现实意义. 针对时间依赖型绿色车辆路径问题(time-dependent green vehicle routing problem, TDGVRP), 考虑车辆不同出发时刻对行驶时间的影响, 分析车辆时变速度、载重与碳排放率之间的关系, 确定基于车辆时变速度和载重的碳排放率度量函数; 在此基础上, 以车辆油耗和碳排放成本、使用时间成本和固定成本、等待成本与人力成本之和作为目标函数, 构建 TDGVRP 模型, 并根据模型特点设计基于路段划分策略的车辆行驶时间计算方法, 提出了改进蚁群算法. 算例仿真结果表明, 构建的模型和提出的算法能合理规划车辆出发时刻, 有效规避交通拥堵时间段, 降低配送总成本, 减少油耗和碳排放.

**关键词:** 时间依赖; 绿色车辆路径问题; 碳排放; 路段划分策略; 蚁群算法

**中图分类号:** F252; U116 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2019)05-0057-12

## 0 引言

随着温室效应的加剧, 气候变暖成为人类当今面临的最严峻挑战之一. 中国政府承诺到 2020 年, 单位国内生产总值 CO<sub>2</sub> 排放比 2005 年下降 40%~50%. 根据国际能源署发布的《来自燃料燃烧的二氧化碳排放 2018: 回顾》报告, 2016 年, 交通运输领域排放的 CO<sub>2</sub> 占全球 CO<sub>2</sub> 排放量的 24%, 其中, 公路运输占运输活动整个 CO<sub>2</sub> 排放量的 74%. 因此, 研究物流配送车辆路径问题时, 应拓展其优化目标, 不但要考虑经济成本, 而且要关注环境目标, 促进物流配送领域的节能减排.

自 1959 年提出车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP) 以来, 产生的大量研究成果, 较多集中在车辆行驶速度恒定的 VRP, 较少关注时变速度对车辆路径的影响. 但在实际路网中, 由于受

上下班高峰期等因素影响, 不同时间段的交通拥堵状况存在较大差异, 车辆行驶速度具有时变性, 使得车辆路径规划需做出相应改变<sup>[1,2]</sup>. Malandraki 分析不同时间段交通拥堵状况对车辆行驶速度的影响, 于 1989 年首次提出时间依赖型 VRP(time-dependent VRP, TDVRP). Ma 等<sup>[3]</sup> 针对易腐产品配送问题, 以预期收益最大化作为优化目标, 构建考虑订单选择的 TDVRP 模型, 提出混合蚁群算法. 代存杰等<sup>[4]</sup> 分析运输网络的随机时间依赖特征, 建立基于多准则路径优化的 TDVRP 模型, 设计了两阶段多维标号修正算法. Sun 等<sup>[5]</sup> 以收益最大化作为优化目标, 构建同时收送货 TDVRP 模型, 采用分支定价算法求解. Alinaghian 等<sup>[6]</sup> 考虑二维装箱约束, 以车辆总行驶时间和总容量最小化作为优化目标, 建立双目标 TDVRP 模型, 提出

① 收稿日期: 2018-04-23; 修订日期: 2018-12-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71704052); 湖南省重点研发计划资助项目(2016NK2127); 湖南省社会科学基金资助项目(17YBA243).

通讯作者: 刘长石(1975—), 男, 湖南邵阳人, 博士, 副教授, Email: liuchangshi964@126.com

了精英非主导排序局部搜索算法. 刘兰芬和杨信丰<sup>[7]</sup>分析车辆出发时刻对行驶时间的影响,以车辆使用数、总配送时间最小化和顾客满意度最大化作为优化目标, Ye 等<sup>[8]</sup>以车辆使用数、总行驶距离、总配送时间最小化作为优化目标,建立多目标 TDVRP 模型,分别采用遗传算法和多类型蚂蚁系统算法求解.

近年来,倡导绿色发展,绿色 VRP (green VRP, GVRP) 已引起一些学者的关注. Erdogan 和 Miller-Hooks<sup>[9]</sup>于 2012 年首次提出 GVRP. 吴丽荣等<sup>[10]</sup>设计了油耗率函数,以油耗最小化作为优化目标建立 VRP 模型,提出了两阶段求解算法. Costa 等<sup>[11]</sup>以碳排放量最小化作为优化目标建立 GVRP 模型,采用遗传算法求解. Jabir 等<sup>[12]</sup>以经济成本和碳排放成本之和作为目标函数,建立多车场 GVRP 模型,提出基于可变邻域搜索的改进蚁群算法. Li 等<sup>[13]</sup>以油耗和碳排放成本构成的可变成本与车辆固定成本之和作为目标函数,建立多车型 GVRP 模型,提出了基于分割的自适应禁忌搜索算法. Niu 等<sup>[14]</sup>以油耗成本、碳排放成本与驾驶员工资之和作为目标函数,建立开放式 GVRP 模型,提出基于邻域搜索的混合禁忌搜索算法. 为突出车辆碳排放对环境污染的影响, Bektaş 和 Laporte<sup>[15]</sup>综合考虑车辆油耗、碳排放和行驶时间等因素,于 2011 年首次提出污染路径问题 (pollution routing problem, PRP), 并构建 PRP 混合整数规划模型. 葛显龙等<sup>[16]</sup>以车辆数、碳排放量和行驶距离最小化作为优化目标,建立多目标开放式 PRP 模型,提出改进自适应遗传算法. Kumar 等<sup>[17]</sup>以运行成本和碳排放成本最小化作为优化目标建立多目标 PRP 模型,设计了自学习粒子群算法. Eshtehadi 等<sup>[18]</sup>针对车辆行驶时间和客户需求不确定的 PRP,以油耗最小化作为优化目标,构建带车流量约束的 PRP 模型,采用鲁棒优化技术求解.

时间依赖型 GVRP (time-dependent GVRP, TDGVRP) 的研究始于 2010 年, Kuo<sup>[19]</sup>以油耗最小化作为优化目标构建 TDVRP 模型,采用模拟退火算法求解. Qian 等<sup>[1]</sup>以碳排放量最小化作为优化目标,构建带容量和时间窗约束的 TDVRP 模型,提出了基于列生成的禁忌搜索算法. Naderipour 等<sup>[20]</sup>分析车辆出发时刻和行驶时间的关系,

以碳排放成本和驾驶员成本的加权和最小化作为优化目标,构建开放式 TDVRP 模型,提出了改进粒子群算法. Xiao 和 Konak<sup>[21]</sup>考虑时变交通拥堵状况,以碳排放量最小化作为优化目标,构建多车型 TDVRP 模型,提出了基于整数规划和邻域搜索的混合算法;以碳排放量和延迟惩罚之和作为优化目标,构建带时间窗约束的 TDVRP 模型,提出了结合精确动态规划和遗传算法的混合算法<sup>[22]</sup>. Franceschetti 等<sup>[23]</sup>以驾驶员工资与温室气体排放成本之和作为优化目标构建 TDPRP 模型,提出了自适应大邻域搜索算法. Çimen 和 Soysal<sup>[24]</sup>考虑时间依赖性和随机车辆速度对油耗和碳排放的影响,将 TDGVRP 视为马尔可夫决策过程,提出了近似动态规划方法. Huang 等<sup>[25]</sup>以油耗成本和车辆折旧费之和作为优化目标,建立具有路径选择灵活性的 TDVRP 模型,设计了路由路径近似方法. Soysal 和 Çimen<sup>[26]</sup>以碳排放量最小化作为优化目标,构建带容量约束的 TDGVRP 模型,采用动态规划方法求解. Matos 等<sup>[27]</sup>考虑时变交通拥堵状况对碳排放的影响,以碳排放量最小化作为优化目标,建立多车型 TDGVRP 模型,提出了基于局部搜索和可变邻域的混合算法. Poonthali 和 Nadarajan<sup>[2]</sup>考虑时变速度对路径成本和油耗的影响,以行驶距离和油耗最小化作为优化目标,构建双目标 TDVRP 模型,提出了带贪婪变异算子的粒子群算法.

综上所述,已有成果为进一步深入研究 TDGVRP 奠定了良好基础,但仍存在如下研究缺口:1) 已有 TDVRP 文献在研究时变路网中不同车速对路径规划的影响时,大都假设车辆在 0 时刻出发,关于车辆从不同时刻出发规避交通拥堵时间段的研究成果相对缺乏;2) 已有 TDGVRP 文献较少综合考虑车辆油耗和碳排放、车辆使用可变成本和固定成本等因素及其关联性,较少分析车辆能耗成本与使用成本之间的关系;3) 已有成果一般是根据车辆行驶距离计算使用成本,但在时变路网环境下,行驶距离最短并不一定对应行驶时间最短,根据行驶距离计算使用成本有可能导致车辆油耗和碳排放成本与使用成本不是最低,不利于规避交通拥堵时间段;4) 关于时间依赖型车辆行驶时间的计算,已有成果主要参考 Jabali 等<sup>[28]</sup>提出的理论模型,关于计算方法的研

究比较缺乏. 基于上述情况, 本文在调研访谈物流配送企业的基础上, 分析城市路网的时变特性, 引入交通拥堵系数表征不同时间段道路的交通拥堵程度; 考虑车辆时变速度和不同载重对碳排放率的影响, 确定基于车辆时变速度和载重的碳排放率度量函数; 按不同时间段的速度和不同路段的载重计算各路段的油耗成本和碳排放成本, 根据行驶时间计算各路段的车辆使用成本和人力成本, 同时考虑车辆等待成本和固定发车费用, 以总成本最小化作为优化目标构建带容量和时间窗约束的 TDGVRP 模型; 在此基础上, 设计基于路段划分策略的车辆行驶时间计算方法, 提出用改进蚁群算法进行求解; 最后, 通过算例仿真验证本文构建的模型和提出的算法能科学规划车辆出发时刻, 有效规避交通拥堵时间段, 并分析车辆能耗成本与使用成本之间的关系, 据此提出相关建议. 期望本文能为物流配送企业推进节能减排提供决策参考.

## 1 问题与模型

### 1.1 问题描述

TDGVRP 描述为: 配送中心往多个需求点配送货物, 需求点的位置与需求量已知, 不同时间段的车辆行驶速度受交通状况影响, 目标是实现总成本最小化的最优车辆路径规划. 为明确本研究适用范围, 作出如下假设: 1) 配送车辆均为同种车型, 从配送中心出发, 完成任务后返回配送中心; 2) 根据实际需要, 不同车辆可在不同时刻出发; 3) 车辆在正常行驶时间段, 以正常速度行驶, 在交通拥堵时间段, 以拥堵速度行驶; 4) 每辆车运载的货物重量不能超过其容量, 每个需求点有且仅有 1 辆车为其服务; 5) 各需求点均有服务时间窗要求, 且其需求量小于车辆容量; 6) 如果车辆提前到达, 不能提前服务, 必须等待至最早服务时间才能开始服务; 7) 车辆使用成本包括车辆使用时间成本、人力成本、等待成本和固定发车费用; 8) 车辆在需求点等待和服务期间, 发动机关闭, 不产生油耗和碳排放.

### 1.2 符号和变量

参数和决策变量及其含义如表 1 所示.

表 1 参数和决策变量及其含义

Table 1 Variable and their meanings

变量	含义
$N$	配送网络内所有节点集合 $N = \{0, 1, \dots, n\}$
$N'$	$N' = N \setminus \{0\}$ 为需求点集合
$A$	节点之间的道路集合 $A = \{(i, j) : i \neq j, i \in N, j \in N\}$
$D_{ij}$	从节点 $i$ 到节点 $j$ 的距离
$Q$	配送车辆的容量(重量单位)
$q_i$	需求点 $i$ 的需求量, $q_i \leq Q$
$g$	需求点 $i$ 的服务时间
$B_i$	需求点 $i$ 的最早开始服务时间
$E_i$	需求点 $i$ 的最晚开始服务时间
$K^f$	配送网络正常时间段 $k$ 的集合
$K^c$	配送网络拥堵时间段 $k$ 的集合
$K$	时间段 $k$ 的集合, $K = K^c \cup K^f, k \in K$
$b_k$	时间段 $k$ 的开始时间
$e_k$	时间段 $k$ 的结束时间
$H$	配送车辆 $h$ 的集合, $h \in H$
$v_f$	车辆在正常时间段 $K^f$ 内的行驶速度
$\rho_k$	表征在拥堵时间段 $K^c$ 内道路交通拥堵程度的交通拥堵系数
$v_c$	车辆在拥堵时间段 $K^c$ 内的行驶速度 $v_c = v_f / (1 + \rho_k)$
$v_{ijk}$	车辆在时间段 $k$ 内行驶在道路 $(i, j)$ 上的速度, 如果 $k \in K^f, v_{ijk} = v_f$ ; 否则, $v_{ijk} = v_c$
$t_{ijh}$	车辆 $h$ 行驶完道路 $(i, j)$ 全程的时间
$d_{ijhk}$	车辆 $h$ 在时间段 $k$ 内以速度 $v_{ijk}$ 在道路 $(i, j)$ 上行驶的里程
$t_{ijkh}$	车辆 $h$ 在时间段 $k$ 内以速度 $v_{ijk}$ 在道路 $(i, j)$ 上行驶的时间, $t_{ijkh} = d_{ijhk} / v_{ijk}$
$\beta_i$	车辆到达节点 $i$ 的时间
$l_i$	车辆离开节点 $i$ 的时间
$\sigma_{ih}$	车辆 $h$ 提前到达节点 $i$ 的等待时间
$f_{ijk}$	车辆在时间段 $k$ 内行驶在道路 $(i, j)$ 上的油耗率 (L/km)
$c_{ijk}$	车辆在时间段 $k$ 内行驶在道路 $(i, j)$ 上的碳排放率 (kg/km)
$\mu$	车辆使用单位时间成本 (元/h)
$\psi$	车辆使用单位时间人力成本 (元/h)
$\xi$	车辆的固定发车费用 (元/辆)
$\lambda_f$	单位油耗成本 (元/L)
$\lambda_e$	单位碳排放成本 (元/kg)
$X_{ih}$	0-1 变量, 当需求点 $i$ 由车辆 $h$ 服务时值为 1, 否则为 0
$x_{ij}$	0-1 变量, 当道路 $(i, j)$ 有车辆行驶时值为 1, 否则为 0
$\delta_h$	0-1 变量, 当车辆 $h$ 被使用时值为 1, 否则为 0
$y_{ijh}$	0-1 变量, 当车辆 $h$ 行驶在道路 $(i, j)$ 时值为 1, 否则为 0
$z_{ijhk}$	0-1 变量, 当道路 $(i, j)$ 在时间段 $k$ 内有车辆 $h$ 行驶时值为 1, 否则为 0

### 1.3 数学模型

以所有车辆的油耗成本、碳排放成本以及车辆使用时间成本、人力成本、等待成本和固定发车费用之和作为优化目标构建带容量和时间窗约束的 TDGVRP 模型,如下所示

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} z_{ijkh} v_{ijkh} t_{ijkh} f_{ijk} \lambda_f + \\ & \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} z_{ijkh} v_{ijkh} t_{ijkh} c_{ijk} \lambda_e + \\ & \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} z_{ijkh} t_{ijkh} (\mu + \psi) + \\ & \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} \sigma_{ih} (\mu + \psi) + \sum_{h \in H} \delta_h \xi \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{h \in H} X_{ih} = 1, \forall i \in N' \quad (2)$$

$$x_{ij} = \sum_{h \in H} y_{ijh}, \forall (i, j) \in A \quad (3)$$

$$y_{ijh} \geq z_{ijkh}, \forall (i, j) \in A, k \in K, h \in H \quad (4)$$

$$y_{ijh} \leq \sum_{k \in K} z_{ijkh}, \forall (i, j) \in A, h \in H \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} y_{ijh} = \sum_{j \in N} y_{ijh}, \forall h \in H \quad (6)$$

$$\sum_{j \in N'} y_{0jh} \leq 1, \forall h \in H \quad (7)$$

$$d_{ijkh} \leq D_{ij} z_{ijkh}, \forall (i, j) \in A, k \in K, h \in H \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{h \in H} d_{ijkh} = D_{ij} x_{ij}, \forall (i, j) \in A \quad (9)$$

$$\beta_i + g_i \leq l_i, \forall i \in N \quad (10)$$

$$\beta_i + \sigma_{ih} \geq B_i, \forall i \in N \quad (11)$$

$$\beta_i + \sigma_{ih} \leq E_i, \forall i \in N \quad (12)$$

$$t_{ijh} = \sum_{k \in K} t_{ijkh} y_{ijh}, \forall i \in N, j \in N, h \in H \quad (13)$$

$$\beta_j = l_j + t_{ijh} \quad (14)$$

$$\sum_{j \in N'} \sum_{i \in N} q_j y_{ijh} \leq Q, \forall h \in H \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} D_{ij} \geq 0, Q \geq 0, q_i \geq 0, B_i \geq 0, \\ E_i \geq 0, g_i \geq 0, b_k \geq 0, e_k \geq 0, \\ \sigma_{ih} \geq 0, v_{ijk} \geq 0, d_{ijkh} \geq 0, t_{ijkh} \geq 0, \\ c_{ijk} \geq 0, f_{ijk} \geq 0, \beta_i \geq 0, l_i \geq 0 \\ X_{ih} \in \{0, 1\}, x_{ij} \in \{0, 1\}, \delta_h \in \{0, 1\}, \\ y_{ijh} \in \{0, 1\}, z_{ijkh} \in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$y_{ijh} \in \{0, 1\}, z_{ijkh} \in \{0, 1\} \quad (17)$$

目标函数式(1)表示最小化总配送成本,包括车辆油耗成本、碳排放成本、车辆使用时间成本和人力成本、等待成本以及固定发车费用.式(2)表示每个需求点必须且只能被车辆访问1次;式(3)表示选择的道路只允许1辆车行驶;式(4)与

式(5)表示变量  $y_{ijh}$  与  $z_{ijkh}$  之间的限制关系;式(6)保证车辆到达与离开的是同一个需求点;式(7)表示每辆车最多只能使用1次;式(8)表示变量  $d_{ijkh}$  与  $D_{ij}$  之间的限制关系;式(9)保证只要道路被某车辆选择,该车辆就要行驶完整条道路;式(10)表示需求点到达时间、服务时间与离开时间之间的关系;式(11)与式(12)表示需求点的时间窗约束;式(13)表示车辆在道路  $(i, j)$  上全程行驶时间的计算;式(14)表示车辆在不同路段上行驶的时间衔接关系;式(15)表示车辆容量约束;式(16)与式(17)表示变量取值约束.

### 1.4 车辆碳排放率和油耗率的计算

吴丽荣等<sup>[10]</sup>、Demir等<sup>[29]</sup>、Suzuki<sup>[30]</sup>与Hickman<sup>[31]</sup>等学者对车辆油耗和碳排放的影响因素进行了研究,指出车辆行驶距离对油耗和碳排放起着决定性作用,车速、车辆载重、交通拥堵状况以及车辆特征参数等因素对油耗和碳排放将产生重要影响,并提出多种油耗和碳排放测度模型.本文采用Hickman<sup>[31]</sup>提出的MEET模型计算车辆碳排放率和油耗率(不考虑坡度的影响),MEET模型包括碳排放率估计函数、载重修正因子、道路坡度修正因子等,适用于重量范围为3.5t—32t的重型货车.碳排放率估计函数为

$$\begin{aligned} \varepsilon(v) = \omega_0 + \omega_1 v + \omega_2 v^2 + \omega_3 v^3 + \\ \frac{\omega_4}{v} + \frac{\omega_5}{v^2} + \frac{\omega_6}{v^3} \end{aligned} \quad (18)$$

式中  $\varepsilon(v)$  为车辆空载并在坡度为0的道路上行驶时的碳排放率(g/km);  $v$  是车辆行驶速度(km/h);  $\omega_0, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$  为预定义参数,载重不同的货车其取值不同.  $\varepsilon(v)$  为凸函数,存在使碳排放率最小的最佳速度  $v^*$ ,  $v^*$  为71 km/h<sup>[32]</sup>.

考虑载重对车辆油耗和碳排放的影响,碳排放率的计算必须进行修正,MEET模型的载重修正因子  $LC$  为

$$\begin{aligned} LC = \chi_0 + \chi_1 \gamma + \chi_2 \gamma^2 + \chi_3 \gamma^3 + \\ \chi_4 v + \chi_5 v^2 + \chi_6 v^3 + \frac{\chi_7}{v} \end{aligned} \quad (19)$$

式中  $\gamma$  为车辆实际载重与其容量的比值;  $v$  为车辆行驶速度;  $\chi_0, \chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4, \chi_5, \chi_6, \chi_7$  为预

定义参数,载重不同的货车其取值不同.

同时考虑速度和载重对碳排放率的影响,车辆的碳排放率  $c_{ijk}$  (kg/km) 可表示为

$$c_{ijk} = \varepsilon(v)LC/1\ 000 \quad (20)$$

在物流配送过程中,车辆单位油耗产生的碳排放量通常是一固定常量,本文参考文献[33]的方法,设定1 L汽油产生2.3 kg的碳排放量,则产生1 kg碳排放量的油耗为  $\delta = 1/2.3 = 0.434\ 8$  L/kg. 据此,可获得车辆的油耗率  $f_{ijk}$  (L/km) 为

$$f_{ijk} = \delta c_{ijk} \quad (21)$$

## 2 基于路段划分的改进蚁群算法设计

### 2.1 基于路段划分的车辆行驶时间计算方法

在传统VRP中,车辆行驶速度没有时间依赖性,以恒速行驶.但TDGVRP与传统VRP不同,车辆行驶速度具有时间依赖性,即车辆在不同时间段内的行驶速度可能存在差异.特别要指出的是,车辆即使在同一路段上行驶,可能在路段的一部分处于正常行驶时间段以正常速度行驶,而在路段的其余部分处于拥堵时间段以拥堵速度行驶.因此,车辆在路段  $(i,j)$  上的行驶时间难以直接计算,必须合理处理.

由驾驶规律可知,车辆在足够短距离(例如200 m)的子路段上行驶时,其实时行驶速度可以不考虑时间依赖性.因此,根据问题特点,设计基于时间依赖的路段划分方法,计算时间段  $k$  内车辆  $h$  在路段  $(i,j)$  上的行驶时间  $t_{ijkh}$ ,步骤如下.

**步骤1** 路段划分.对于时间段  $k$  内车辆  $h$  将要行驶的路段  $(i,j)$ ,按照某一预定距离  $\vartheta$  将路段  $(i,j)$  划分为  $\rho = \lceil D_{ij}/\vartheta \rceil$  个子路段.前  $\rho - 1$  个子路段的距离都是  $\vartheta$ ,最后一个子路段的距离是  $D_{ij} - \vartheta(\rho - 1)$ .

**步骤2** 第一个子路段的车辆行驶时间计算.将时间段  $k$  内车辆  $h$  行驶到节点  $i$  的时间  $t_{ikh}$  作为该车辆驶入路段  $(i,j)$  的第一个子路段  $\omega_{ij}^{(1)}$  的出发时间,判断  $t_{ikh}$  是否属于拥堵时间段,如果是,车辆以拥堵时速  $v_c$  行驶该子路段,到达子路段  $\omega_{ij}^{(1)}$  终点的时间  $t_{ijkh}^{(1)} = t_{ikh} + \vartheta/v_c$ ; 否则,以正常时速  $v_f$  行驶该子路段,到达子路段  $\omega_{ij}^{(1)}$  终点的时间

$t_{ijkh}^{(1)} = t_{ikh} + \vartheta/v_f$ . 时间段判断:如果  $t_{ijkh}^{(1)} \geq e_k$ ,  $k = k + 1$ .

**步骤3** 中间子路段的行驶时间计算.将上一子路段  $\omega_{ij}^{(\lambda)}$  的车辆到达时间  $t_{ijkh}^{(\lambda)}$  作为下一子路段  $\omega_{ij}^{(\lambda+1)}$  的车辆  $h$  出发时间,判断  $t_{ijkh}^{(\lambda)}$  是否属于拥堵时间段,如果是,车辆以拥堵时速  $v_c$  行驶该子路段,到达子路段  $\omega_{ij}^{(\lambda+1)}$  终点的时间  $t_{ijkh}^{(\lambda+1)} = t_{ijkh}^{(\lambda)} + \vartheta/v_c$ ; 否则,以正常时速  $v_f$  行驶该子路段,到达子路段  $\omega_{ij}^{(\lambda+1)}$

终点的时间  $t_{ijkh}^{(\lambda+1)} = t_{ijkh}^{(\lambda)} + \vartheta/v_f$ . 时间段判断:如果  $t_{ijkh}^{(\lambda+1)} \geq e_k$ ,  $k = k + 1$ .

**步骤4** 最后一个子路段的行驶时间计算.判断  $t_{ijkh}^{(\rho-1)}$  是否属于拥堵时间段,如果是,车辆  $h$  以拥堵时速  $v_c$  行驶,到达子路段  $\omega_{ij}^{(\rho)}$  终点的时间  $t_{ijkh}^{(\rho)} = t_{ijkh}^{(\rho-1)} + [D_{ij} - \vartheta(\rho - 1)]/v_c$ ; 否则,以正常时速  $v_f$  行驶该子路段,到达子路段  $\omega_{ij}^{(\rho)}$  终点的时间  $t_{ijkh}^{(\rho)} = t_{ijkh}^{(\rho-1)} + [D_{ij} - \vartheta(\rho - 1)]/v_f$ . 时间段判断:如果  $t_{ijkh}^{(\rho)} \geq e_k$ ,  $k = k + 1$ .

### 2.2 改进蚁群算法设计

VRP已被证明是NP-hard问题,TDGVRP比普通VRP更复杂,求解更加困难.蚁群算法具有分布计算、信息正反馈和启发式搜索等特征,本质上是种启发式全局优化算法,为更好地解决复杂组合优化问题提供了可能,已被应用到各个研究领域<sup>[34,35]</sup>.因此,本文将时间依赖型路段划分策略融入经典蚁群算法,设计成改进蚁群算法求解本文的TDGVRP模型.具体步骤如下.

**步骤1** 初始化.初始化各变量与参数,令全局最优解为  $L$ 、迭代计数器  $iter = 0$ 、最大迭代次数为  $MAXiter$ ,将  $M$  只蚂蚁随机放置在不同节点,令新增车辆标志  $G_h = 1$ .

**步骤2** 状态转移规则.时刻  $\tau$  蚂蚁  $m$  位于当前节点  $i$ ,在候选节点列表表中找出所有未走过的节点,并在未走过节点中按照式(22)选择蚂蚁的下一个访问节点  $j$

$$j = \begin{cases} \arg \max [W_{ij}(\tau)]^\theta [\eta_{ij}(\tau)]^\xi, & \text{若 } \zeta \leq p_i \\ \text{随机选择 } j \notin \text{tabu}_m, & \text{否则} \end{cases} \quad (22)$$

式中  $tabu_m$  为禁忌表,记录蚂蚁  $m$  已经访问过的节点;  $W_{ij}$  表示信息素浓度;  $\eta_{ij}$  表示能见度(节点之间距离的倒数),  $\eta_{ij} = 1/D_{ij}$ ,  $\theta, s$  分别表示信息素浓度和能见度的相对重要性;  $\zeta$  表示在  $(0, 1)$  内取值的随机数,  $p_i$  表示随着进化过程动态调整的选择概率,且  $p_0 = 1$ .

**步骤 3** 车辆出发时间计算. 1) 采用路段划分策略计算车辆  $h$  在路段  $(i, j)$  上的行驶时间  $t_{ijkh}$ . 2) 如果当前车辆  $h$  的  $G_h = 1$ , 根据节点  $j$  的时间窗  $[B_j, E_j]$  来合理确定车辆  $h$  的出发时间段  $k$ , 并在时间段  $k$  内随机产生车辆  $h$  的出发时间  $R_h^{(k)}$ . 3) 判断车辆  $h$  是否满足车辆容量与时间窗限制, 如果满足,  $j \in tabu_m, G_h = 0$ ; 如果不满足, 返回节点 0,  $G_h = 1$ , 转步骤 2. 4) 如果蚂蚁  $m$  访问完所有节点, 令  $m = m + 1$ . 5) 如果  $m = M$ , 所有蚂蚁搜索完毕, 转步骤 4, 否则, 转步骤 2.

**步骤 4** 当前迭代的目标函数值计算. 1) 根据式(1)计算每只蚂蚁的搜索路径  $path_m$  的目标函数值  $cost_m$ . 当前迭代的目标函数值为  $L_{iter} = \min(cost_m)$ . 2) 记录结果, 如果  $L > L_{iter}$ , 则  $L = L_{iter}$ .

**步骤 5** 全局信息素更新. 在所有蚂蚁都遍历完所有节点以后, 对最优路径的组成路段进行信息素  $\Gamma$  更新. 即

$$\Gamma_{ij}^{new} = \Gamma_{ij}^{old} (1 - \alpha) + \sum_m \Delta \Gamma_{ij}^{(m)} \quad (23)$$

式中  $\alpha$  为信息素挥发性,  $0 \leq \alpha < 1$ ;  $\Delta \Gamma_{ij}^{(m)}$  为蚂蚁  $m$  在路段  $(i, j)$  上留下的单位长度轨迹信息素数量.

**步骤 6** 算法结束判断. 如果  $iter < MAXiter$ , 转步骤 2, 使  $iter = iter + 1$ ; 否则, 算法结束.

### 3 算例仿真

#### 3.1 实验设置

采用 Solomon 的 VRPTW 标准测试问题库<sup>[36]</sup> 中的算例 RC208 进行仿真实验, 该算例的需求点数量为 100 个; 配送中心的地址坐标为  $(40, 50)$ , 服务时间为 960 min, 即 16 h; 车辆容量为 1 000 个重量单位. 令 1 个重量单位为 4 kg, 则车辆容量为 4 000 kg, 根据文献[31], 对于容量为 4 t 的车辆, 对应的碳排放率的系数  $\omega$  为:  $\omega_0 = 110, \omega_1 = 0, \omega_2 = 0, \omega_3 = 0.000\ 375, \omega_4 = 8\ 702, \omega_5 = 0, \omega_6 =$

0; 对应的载重修正因子的系数  $\chi$  为:  $\chi_0 = 1.27, \chi_1 = 0.061\ 4, \chi_2 = 0, \chi_3 = -0.001\ 1, \chi_4 = -0.002\ 35, \chi_5 = 0, \chi_6 = 0, \chi_7 = -1.33$ . 根据目前交通运输和碳交易市场的行情, 并参考文献[32]的数据, 将与费用有关的参数设置如下:  $\mu = 90$  元/h,  $\Psi = 24$  元/h,  $\lambda_f = 7.5$  元/L,  $\lambda_e = 0.052\ 8$  (元/kg),  $\xi = 500$  元/辆.

根据城市配送的实际情况, 本文设定车辆从配送中心出发的最早时间为 6:00, 回到配送中心的最晚时间为 22:00, 每 30 min 作为一个时间段, 即 6:00 ~ 6:30 为第 1 时间段, 6:30 ~ 7:00 为第 2 时间段, 以此类推, 配送中心服务时间共分为 32 个时间段. 根据城市交通规律, 将 7:00 至 9:00、17:00 至 19:00 设为交通拥堵时间段, 其余时间段设为正常行驶时间段. 假定在正常行驶时间段内, 车辆以碳排放量最少的最佳速度行驶, 即车辆正常行驶速度  $v_f$  为 71 km/h; 在拥堵时间段, 取拥堵系数  $\rho_k = 2.55$ , 对应的  $v_c$  为 20 km/h. 为便于仿真分析, 设定车辆从配送中心出发的最早时间 6:00 为零时刻.

程序采用 Matlab R2016a 编程实现. 程序运行环境: 在 CPU 1.90GHz、内存 4G 的微机上进行. 算法参数设置如下: 最大迭代次数  $MAXiter = 600$ 、蚂蚁数  $M = 30$ 、信息素浓度  $W_{ij} = 20$ 、信息素浓度相对重要性  $\theta = 1$ 、能见度相对重要性  $s = 3$ 、信息素挥发性  $\alpha = 0.2$ .

#### 3.2 算例仿真结果分析

##### 3.2.1 车辆路径规划及配送时间分布

程序一共运行 10 次, 平均运行时间为 207.144 s, 说明本文算法能在较短时间内得到较优车辆路径规划. 程序运行 10 次的最优车辆路径规划如图 1 所示, 图 1a) 表示算例 RC208 的最优车辆行驶路径, 图 1b) 表示算法的目标函数适应度曲线. 图 1a) 中共有 7 条车辆行驶路径, 算例 RC208 的最优行驶路径与时间分布如表 2 所示.

表 2 中, “车辆行驶路径” 栏中的 “0” 表示配送中心, 其余数字表示需求点序号; “车辆配送时间” 栏中第一个数字表示车辆从配送中心出发的具体时间 (min), 最后一个数字表示回到配送中心的时间 (min), 其余数字表示到达需求点的时间 (min).

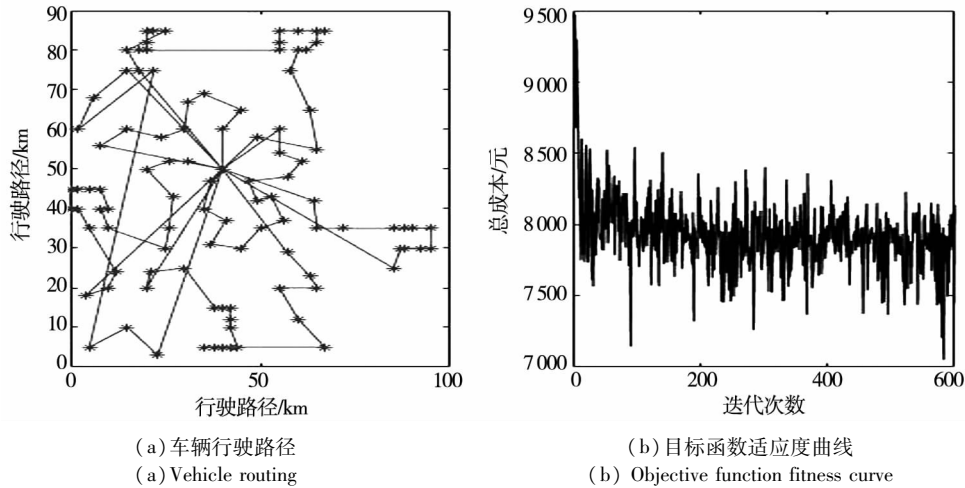


图 1 最优车辆路径规划

Fig.1 Best result of model optimization

表 2 算例 RC208 的最优行驶路径与时间分布

Table 2 Routing and time distribution of simulation examples RC208

车辆序号	车辆行驶路径	车辆配送时间	车辆出发时间段
1	0-90-65-66-83-64-56-95-92-91-80-94-93-96-54-0	200.41-204-220.76-404-420.76-439.21-455.97-472.73-489.49-504.56-519.63-539.77-554.84-571.61-586.67-601.9	7
2	0-68-61-70-100-55-88-60-78-0	427.43-436-452.76-472.9-487.97-504.73-521.49-539.94-558.39-585.9	15
3	0-84-85-63-51-76-89-25-23-21-48-18-19-49-20-22-24-57-86-74-0	231.98-259-277.45-290.83-309.28-327.73-346.18-386-399.38-411.07-422.76-434.45-449.52-461.21-474.59-486.28-497.97-519.8-538.25-553.32-583.79	8
4	0-69-98-53-82-99-52-9-11-10-12-14-47-17-16-15-13-87-59-97-0	10.66-18.45-33.52-239-257.45-275.9-290.97-314.49-329.56-404-419.07-432.45-445.83-457.52-472.59-484.28-499.35-521.18-536.25-553.01-601.18	1
5	0-81-71-72-41-39-38-37-36-35-40-43-44-42-46-4-45-5-3-1-8-6-0	238.82-249-274.21-294.35-314.49-329.56-341.25-410-423.38-435.07-451.83-466.9-480.28-491.97-534.08-545.77-557.46-570.84-582.53-595.91-616.05-631.12-659.26	8
6	0-67-62-50-34-31-29-27-26-28-30-32-33-0	49.71-100-129.69-351-372.83-386.21-397.9-412.97-428.04-441.42-454.8-465.64-480.71-524.21	2
7	0-7-79-73-2-75-58-77-0	58.56-161-215-233.45-265.42-337.95-401-421.14-463.38	2

由表 2 可知:1) 车辆行驶路径结果显示,不同车辆配送的需求点数量存在较大差别,配送需求点数量最多的 5 号车达到 21 个,数量最少的 7 号车只有 7 个.之所以存在如此大的差别,其原因是 100 个需求点的时间窗都不一样,车辆路径规划在确保目标函数值最小的同时,必须满足所有需求点的时间窗要求;2) 从车辆配送时间分布可知,7 辆车的服务时间长度均不同,4 号车的配送

时间最长,达 590.52 min,2 号车的配送时间最短,仅 158.47 min;车辆离开和返回配送中心的时间表明,7 辆车中,有 4 辆车(车辆 1、2、3 与车辆 5)的行驶时间完全避开了 7:00 至 9:00 的早高峰拥堵时间段,同时也避开了 17:00 至 19:00 的晚高峰拥堵时间段;车辆 4、6、7 只进入早高峰拥堵时间段,避开了晚高峰拥堵时间段.如果采用传统的算法,车辆都从零时刻出发,则所有车辆都不能

避开早高峰拥堵时间段. 说明本文构建的模型和设计的改进蚁群算法能根据客户需求点的时间窗特性, 合理安排车辆配送时间, 有效规避交通拥堵时间段; 3) 从“车辆出发时间段”栏可知, 在第 1 时间段出发的车辆有 1 辆, 在第 2 时间段出发的车辆有 2 辆, 在第 7 时间段出发的车辆有 1 辆, 在第 8 时间段出发的车辆有 2 辆, 在第 15 时间段出发的车辆有 1 辆, 这说明车辆路径规划考虑时间依赖性很有必要, 与物流配送的实际需要较为吻合.

由图 1b) 的算法目标函数适应度曲线可以看出, 随着迭代次数的增加, 算法的适应度值不断降低, 目标函数值不断接近全局最优值, 表明算法收敛速度快, 收敛效果好.

表 3 TDGVRP 与 GVRP 的仿真结果比较

Table 3 Simulation results comparison between TDGVRP and GVRP

算法	总成本/元	油耗和碳排放成本/元	车辆使用成本/元	总行驶时间/min	车辆使用数/辆
TDGVRP	7 150.35	1 302.57	5 847.78	1 818.9	7
GVRP	7 227.02	1 320.34	5 906.67	1 874.61	7

### 3.2.3 不同拥堵程度的仿真结果比较

在算法程序其他条件不变的前提下, 拥堵系数  $\rho_k$  分别取值 0.42、1.00、2.55 (对应的拥堵速度  $v_c$  分别为 50 km/h、35.5 km/h 和 20 km/h) 对算例 RC208 进行仿真实验. 每种情况分别计算 10 次, 取平均值作为最终结果, 如表 4 所示.

由表 4 可知: 1) 随着拥堵系数的增加, 配送总成本、油耗和碳排放成本、车辆使用成本、碳排放量均会不同程度地增加, 说明油耗和碳排放成本、车辆使

表 4 不同拥堵系数的仿真结果比较

Tab. 4 The simulation results comparison among different congestion coefficient

拥堵系数	总成本/元	油耗和碳排放成本/元	车辆使用成本/元	碳排放量/kg	车辆行驶距离/km	车辆行驶时间/min
0.42	7 038.88	1 249.91	5 788.96	415.91	795.26	1 765.89
1.00	7 086.22	1 292.43	5 793.78	428.77	820.04	1 794.36
2.55	7 150.35	1 302.57	5 847.78	433.55	821.43	1 818.9

### 3.2.4 不同优化目标的仿真结果比较

在算法程序其他条件不变的前提下, 分别以所有车辆的油耗和碳排放成本、车辆总行驶距离、车辆总行驶时间最小化作为优化目标, 采用本文算法对算例 RC208 进行仿真实验, 每种情况分别计算 10 次, 取平均值作为最终结果, 与本文以总

### 3.2.2 TDGVRP 与 GVRP 的对比分析

除车辆出发时刻外, 模型的目标函数和其它约束条件不变, 对 TDGVRP 与 GVRP (所有车辆均从 0 时刻出发) 进行算例仿真, 其程序分别运行 10 次, 平均结果如表 3 所示.

表 3 中, 总成本由油耗和碳排放成本、车辆使用成本构成, 其中车辆使用成本包含车辆等待成本、车辆总行驶时间, 车辆使用数量.

表 3 数据表明, TDGVRP 考虑时间依赖性, 其物流配送总成本、油耗和碳排放成本、车辆使用成本和总行驶时间均要优于 GVRP, 二者的车辆使用数一样. 这说明本文构建的模型不仅能降低物流配送总成本、车辆使用成本以及油耗和碳排放成本, 而且能缩短总行驶时间, 是种有效的方法.

用成本以及总的配送成本与交通拥堵程度正相关; 2) 随着拥堵系数的增加, 车辆行驶距离和行驶时间也会增加, 说明交通拥堵状况将对车辆路径规划产生影响; 3) 虽然拥堵系数显著变化, 但是配送总成本、油耗和碳排放成本、车辆使用成本、碳排放量、车辆行驶距离和行驶时间的计算结果变化不大, 主要原因是本文构建的 TDGVRP 模型和提出的求解算法能使大多数车辆有效避开交通拥堵时间段, 减小了交通拥堵对各优化目标的影响.

成本最小化作为优化目标的仿真结果比较, 如表 5 所示.

由表 5 可知: 1) 以车辆油耗和碳排放成本、行驶距离或行驶时间等作为优化目标, 单个目标均能达到最优值, 但物流配送总成本、车辆使用成本和车辆使用数都会大幅增加; 采用本文总成本



最小化作为优化目标,其总成本与车辆使用成本最小,说明本文算法针对不同优化目标都能取得很好的优化结果,能有效求解不同优化目标的 TDGVRP;2)本文以车辆油耗和碳排放成本、车辆使用成本等成本之和作为目标函数,虽然其油耗

和碳排放成本、车辆行驶距离与行驶时间不是最优,但其车辆使用成本和车辆使用数最小,从而使总成本最低,说明本文构建的模型能在油耗和碳排放成本、车辆使用成本和车辆使用数等多个因素之间取得折中,最终使物流配送总成本最低.

表 5 不同优化目标的仿真结果比较

Table 5 Simulation results comparison among different optimization targets

优化目标	总成本/元	车辆使用成本/元	油耗和碳排放成本/元	行驶距离/km	行驶时间/min	车辆使用数/辆
油耗和碳排放成本	8 102.61	6 898.51	1 204.11	743.93	1 781.96	9
总行驶距离	7 934.03	6 717.77	1 216.25	740.49	1 820.93	8.5
总行驶时间	8 196.56	6 961.28	1 235.29	787.11	1 746.08	9.1
本文的优化目标	7 150.35	5 847.78	1 302.57	821.43	1 818.9	7

3.2.5 油耗和碳排放成本与车辆使用成本的关系分析

为分析车辆油耗和碳排放成本与车辆使用成本之间的关系,在其他变量参数不变的情况下,将油耗和碳排放成本、车辆使用成本分别乘以权重  $w_1, w_2$ , 权重分别以 0.1 的梯度予以赋值,且  $w_1 + w_2 = 1, w_1 < 1, w_2 < 1$ . 为突出节能减排,令  $w_1 \geq w_2$ . 算例 RC208 在各种权重组合下分别计算 10 次,取平均值作为最终结果,计算结果如表 6 所示. 表 6 中,加权目标值由油耗和碳排放成本乘以权重  $w_1$  与车辆使用成本乘以权重  $w_2$  组成.

由表 6 可知: 1) 配送总成本由车辆使用成本、油耗和碳排放成本两部分组成,车辆使用成本占总成本的比例最低都达 81.23%,说明物流配送

成本主要来自车辆使用成本,要降低物流配送总成本,应尽可能降低车辆使用成本;2) 油耗和碳排放成本占物流配送总成本的比例较低,其占比最高只达到 18.76%,且主要为油耗成本,碳排放成本在物流配送总成本中的占比非常低,最高只占总成本的 0.348%. 这说明当前 0.052 8 元/kg 的碳排放交易价格过低,从物流配送成本的角度来看,物流企业根本不会注重碳排放成本,目前的碳排放成本难以真正有效促进物流配送领域的节能减排;3) 当  $w_1, w_2$  均为 0.5 时,车辆使用成本最低,油耗和碳排放成本最高,随着权重  $w_1$  的上升,油耗和碳排放成本不断减少,车辆使用成本不断增加,物流配送总成本不断增加. 这说明 TDGVRP 考虑环境目标,强调节能减排,将导致物流配送总成本增加.

表 6 油耗和碳排放成本与车辆使用成本不同权重组合的仿真结果

Table 6 Simulation results with different weight combinations

$w_1$	$w_2$	加权目标值	总成本/元	油耗和碳排放成本/元	车辆使用成本/元	碳排放成本/元	车辆使用数/辆
0.9	0.1	1 726.07	7 215.50	1 255.65	5 959.85	20.88	7
0.8	0.2	2 206.39	7 189.02	1 280.98	5 908.04	21.42	7
0.7	0.3	2 667.45	7 181.10	1 282.80	5 898.30	21.96	7
0.6	0.4	3 134.40	7 173.40	1 325.20	5 848.20	24.97	7
0.5	0.5	3 563.21	7 126.41	1 336.71	5 789.70	23.17	7

4 结束语

物流配送过程中的车辆油耗和碳排放,对环境污染造成了较大影响,应该引起物流企业

的高度重视,采取实际行动来保护环境. 本文研究了 TDGVRP,考虑车辆时变速度和不同载重对碳排放率的影响,确定基于车辆行驶速度和载重的碳排放率度量函数,以配送总成本最小化作为优化目标构建带时间窗的 TDGVRP 模型,

并设计出基于路段划分策略的改进蚁群算法进行求解. 仿真实验和多组仿真结果表明:1) 本文考虑时变速度对各类成本的影响, 提出改进蚁群算法, 能根据需求点的时间窗要求合理确定车辆的不同出发时间, 有效规避交通拥堵时间段, 缩短车辆行驶时间, 减少车辆等待时间;2) 本文构建的模型能在油耗和碳排放成本、车辆

使用成本和车辆使用数等多个因素之间取得折中, 使物流配送总成本最低, 车辆使用数最少; 提出的改进蚁群算法在不同的优化目标下都能取得非常好的优化结果;3) 碳排放成本在物流配送的总成本中占比非常低, 难以真正促进物流配送领域的节能减排, 相关部门应根据实际情况调整碳交易政策.

### 参 考 文 献:

- [1] Qian J, Eglese R. Fuel emissions optimization in vehicle routing problems with time-varying speeds[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 248(3): 840–848.
- [2] Poonthahir G, Nadarajan R. A fuel efficient green vehicle routing problem with varying speed constraint[J]. *Expert Systems With Applications*, 2018, 100(6): 131–144.
- [3] Ma Z J, Wu Y, Dai Y. A combined order selection and time-dependent vehicle routing problem with time windows for perishable product delivery[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 114(12): 101–113.
- [4] 代存杰, 李引珍, 马昌喜, 等. 随机时间依赖路网中危险品运输路径多准则优化[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(3): 156–164.  
Dai Cunjie, Li Yinzhen, Ma Changxi, et al. Multi-criterion path optimization for hazardous materials transportation in stochastic time dependent road networks[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(3): 156–164. (in Chinese)
- [5] Sun P, Veelenturf L P, Hewitt M, et al. The time-dependent pickup and delivery problem with time windows[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, 116: 1–24.
- [6] Alinaghian M, Zamanlou K, Sabbagh M S. A bi-objective mathematical model for two-dimensional loading time-dependent vehicle routing problem[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2017, 68(11): 1422–1441.
- [7] 刘兰芬, 杨信丰. 时间依赖网络城市物流车辆调度的模型及算法[J]. *工业工程*, 2017, 20(4): 18–24.  
Liu Lanfen, Yang Xinfeng. Model and algorithm of vehicle routing problem for urban logistics in time-dependent network[J]. *Journal of Industrial Engineering*, 2017, 20(4): 18–24. (in Chinese)
- [8] Deng Y, Zhu W H, Li H W, et al. Multi-type ant system algorithm for the time dependent vehicle routing problem with time windows[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2018, 29(3): 625–638.
- [9] Erdogan S, Miller-Hooks E. A green vehicle routing problem[J]. *Transportation Research Part E: Logistics & Transportation*, 2012, 48: 100–114.
- [10] 吴丽荣, 胡祥培, 饶卫振. 考虑燃料消耗率的车辆路径问题模型与求解[J]. *系统工程学报*, 2013, 28(6): 804–811.  
Wu Lirong, Hu Xiangpei, Rao Weizhen. New capacity-vehicle-routing-problem model and algorithm for reducing fuel consumption[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2013, 28(6): 804–811. (in Chinese)
- [11] Costa P R O, Mauceri S, Carroll P, et al. A genetic algorithm for a green vehicle routing problem[J]. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 2018, 64(2): 65–74.
- [12] Jabir E, Panicker V V, Sridharan R. Design and development of a hybrid ant colony-variable neighbourhood search algorithm for a multi-depot green vehicle routing problem[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 57: 422–457.
- [13] Li J, Wang D, Zhang J. Heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem based on fuel and carbon emissions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 201(10): 896–908.
- [14] Niu Y Y, Yang Z H, Chen P, et al. Optimizing the green open vehicle routing problem with time windows by minimizing comprehensive routing cost[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 171(10): 962–971.
- [15] Bektaş T, Laporte G. The pollution-routing problem[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011, 45: 1232

- 1250.
- [16] 葛显龙, 苗国庆, 谭柏川. 开放式污染路径问题优化建模与算法研究[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(4): 46-53.  
Ge Xianlong, Miao Guoqing, Tan Baichuan. Research on optimization modeling and algorithm for open pollution routing problem[J]. Industrial Engineering and Management, 2015, 20(4): 46-53. (in Chinese)
- [17] Kumar R S, Kondapaneni K, Dixit V, et al. Multi-objective modeling of production and pollution routing problem with time window: A self-learning particle swarm optimization approach[J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 99(9): 29-40.
- [18] Eshtehadi R, Fathian M, Demir E. Robust solutions to the pollution-routing problem with demand and travel time uncertainty[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 51: 351-363.
- [19] Kuo Y. Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time-dependent vehicle routing problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 59(1): 157-165.
- [20] Naderipour M, Alinaghian M. Measurement, evaluation and minimization of CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and CO emissions in the open time dependent vehicle routing problem[J]. Measurement, 2016, 90(8): 443-452.
- [21] Xiao Y, Konak A. The heterogeneous green vehicle routing and scheduling problem with time-varying traffic congestion[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 88: 146-166.
- [22] Xiao Y, Konak A. A genetic algorithm with exact dynamic programming for the green vehicle routing & scheduling problem [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 167(11): 1450-1463.
- [23] Franceschetti A, Demir E, Honhon D, et al. A metaheuristic for the time-dependent pollution-routing problem[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 259(3): 972-991.
- [24] Çimen M, Soysal M. Time-dependent green vehicle routing problem with stochastic vehicle speeds: An approximate dynamic programming algorithm[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 54: 82-98.
- [25] Huang Y, Zhao L, Woensel V T, et al. Time-dependent vehicle routing problem with path flexibility[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 95: 169-195.
- [26] Soysal M, Çimen M. A simulation based restricted dynamic programming approach for the green time dependent vehicle routing problem[J]. Computers and Operations Research, 2017, 88(12): 297-305.
- [27] Matos S M R, Frota Y, Ochi L S. Green vehicle routing and scheduling problem with split delivery[J]. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 2018, 69(8): 13-20.
- [28] Jabali O, Woensel V T, Kok A G D. Analysis of travel times and CO<sub>2</sub> emissions in time-dependent vehicle routing[J]. Production & Operations Management, 2012, 21(6): 1060-1074.
- [29] Demir E, Bektaş T, Laporte G. A comparative analysis of several vehicle emission models for road freight transportation [J]. Transportation Research Part D: Transport & Environment, 2011, 16: 347-357.
- [30] Suzuki Y. A dual-objective metaheuristic approach to solve practical pollution routing problem[J]. International Journal of Production Economics, 2016, 176(6): 143-153.
- [31] Hickman A J. Methodology for calculating transport emissions and energy consumption[R]. Cold Starts, 1999.
- [32] 李 进, 张江华. 基于碳排放与速度优化的带时间窗车辆路径问题[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(12): 3063-3072.  
Li Jin, Zhang Jianghua. Vehicle routing problem with time windows based on carbon emissions and speed optimization[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2014, 34(12): 3063-3072. (in Chinese)
- [33] Toro E M, Franco J F, Echeverri M G, et al. A multi-objective model for the green capacitated location-routing problem considering environmental impact[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 110(8): 114-125.
- [34] Abdulkader M M S, Gajpal Y, ElMekkawy T Y. Vehicle routing problem in omni-channel retailing distribution systems [J]. International Journal of Production Economics, 2018, 196(2): 43-55.
- [35] 丁秋雷, 胡祥培, 姜 洋. 基于前景理论的物流配送干扰管理模型研究[J]. 管理科学学报, 2014, 17(11): 1-9.  
Ding Qiulei, Hu Xiangpei, Jiang Yang. A model of disruption management based on prospect theory in logistic distribution [J]. Journal of Management Sciences in China, 2014, 17(11): 1-9. (in Chinese)

- [36] Solomon M M. Algorithms for the vehicle routing problem with time window constraints[J]. Operations Research, 1987, 35 (2): 254 - 265.

## Improved ant colony algorithm and modelling of time-dependent green vehicle routing problem

ZHOU Xian-cheng<sup>1,2</sup>, LIU Chang-shi<sup>1,3\*</sup>, ZHOU Kai-jun<sup>1,2</sup>, HE Cai-hong<sup>4</sup>,  
HUANG Xing-bin<sup>1,2</sup>

1. Mobile E-business Collaborative Innovation Center of Hunan Province, Hunan University of Commerce, Changsha 410205, China;
2. Key Laboratory of Hunan Province for Mobile Business Intelligence, Hunan University of Commerce, Changsha 410205, China;
3. School of Management, Hunan University of Commerce, Changsha 410205, China;
4. School of Accounting, Hunan University of Commerce, Changsha 410205, China

**Abstract:** Green vehicle route planning has an important practical significance for energy saving and carbon emission reduction in the field of logistics and distribution. Aiming at the time-dependent green vehicle routing problem (TDGVRP), the influence of vehicle departure time on vehicle travel time is considered, the effect of a vehicle's time-varying speed and load on carbon emission rate is analyzed, and a carbon emission rate measure function based on a vehicle's time-varying speed and vehicle load is employed in this paper. Then a TDGVRP model with time windows is formulated to minimize the sum of fuel consumption and carbon emission cost, time cost and fixed cost of vehicles, waiting cost and drivers' wages. According to the characteristics of the TDGVRP model, a path division strategy is designed to calculate the vehicle travel time, and an improved ant colony algorithm (IACA) is designed to solve the proposed problem. The experimental results show that the TDGVRP model and IACA can reasonably plan the departure time of each vehicle, effectively avoid periods of traffic congestion, reduce the total distribution costs, and reduce fuel consumption and carbon emissions.

**Key words:** time dependence; green vehicle routing problem; carbon emissions; path division strategy; ant colony algorithm