

引用格式:袁文燕,王青波,吴军,等.基于路径交通拥堵指数的危险废物回收模型研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2019,46(6):85-94.

YUAN WenYan, WANG QingBo, WU Jun, et al. A hazardous waste recycling model based on a route traffic congestion index[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2019,46(6):85-94.

基于路径交通拥堵指数的危险废物回收模型研究

袁文燕¹ 王青波¹ 吴军² 李健^{3*}

(1.北京化工大学 数理学院,北京 100029; 2.北京化工大学 经济管理学院,北京 100029;

3.北京工业大学 经济与管理学院 北京现代制造业发展研究基地,北京 100124)

摘要:针对交通拥堵对危险废物运输中的成本和风险的影响,引入路径交通拥堵指数,建立了时变道路系统中基于交通拥堵指数的危险废物回收双目标优化模型,并对传统蚁群算法中启发式因子计算公式进行了改进,提出了改进的蚁群算法对模型求解,最后以某环保公司危险废物回收问题为背景进行了案例分析。结果表明,不同出发时间和车辆使用模式对帕累托最优解有显著影响,最短路径不一定是耗能最少的行车路线。本文提出的模型和算法可为决策者制定调度方案提供参考。

关键词:危险废物;交通拥堵指数;时变速度;帕累托最优曲线;蚁群算法

中图分类号: O221 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2019.06.013

引言

危险废物(hazardous waste)是指具有腐蚀性、毒性、易燃性、反应性和感染性等特性,或者不排除具有危险特性并可能对环境或人体造成有害影响的固体或液体物质^[1]。目前,我国危险废物产生量呈逐年增长态势,2015年中国的危险废物产生量达4220万吨,并预计以12.0%的复合年增长率增长,危险废物量将由2016年的4850万吨增长至2020年的7620万吨^[2]。2019年部分城市开始了城市垃圾分类,将有毒有害垃圾分离出来,这更增加了危险废物量。危险废物从产生地经运输到达废物处理中心进行处理,期间的各个环节都可能发生事故,对人员、环境造成巨大危害,因此从降低风险的角度研究危险废物的回收运输问题是非常必要的。

目前,最常用的度量危险品运输风险的指标是事故概率和事故后果^[3-5]。Dantzig等^[6]首先提出车辆路径问题(VRP),经改进后的带时间窗的车辆路径问题^[7-9]以及时变道路网络中车辆路径问题^[10-12]等已成为近年来的研究热点。关于危险品运输的车辆路径问题(HVRP),赵晓煌等^[13]提出了带有模糊参数的电子废弃物回收网络优化模型;魏航等^[14-15]在时变网络条件下给出了有害物品运输过程中的路径选择模型;Hu等^[16]考虑了时变条件下两级供应链系统的危险品车辆路径问题;Pradhananga等^[17-18]考虑了路径与调度问题中人口暴露和载荷对风险的影响;袁文燕等^[19]考虑了HVRP中车辆载荷的变化对风险的影响。

拥堵是国内城市交通的现状,也是与物流企业主营业务紧密相关的关键因素。城市交通拥堵指数是评价路网整体运行效率和拥堵状况的无量纲指标,拥堵指数在国内外已经有很多研究,大致可分为以道路状态里程比为基本参数的计算模型和以行程时间或行程速度为基本参数的计算模型两大类^[20],对于同一条道路,城市交通拥堵指数综合反映道路上的车流量、车速、人口密集度等状况。危险废物回收是危险品运输中的一类,因此本文引入路径交通拥堵指数来度量时变道路系统中废物回收问题的风险和行驶成本,建立新的危险废物回收风险-成本

收稿日期:2019-06-12

基金项目:国家自然科学基金(71571010);北京市长城学者培养计划(CIT&TCD20180305);北京市社科基金(17GLB014);国家重点研发计划(2016YFC0801500)

第一作者:女,1969年生,副教授

*通信联系人

E-mail: lijiansem@bjut.edu.cn

双目标优化模型,同时在对蚁群算法进行改进的基础上,通过对某环保公司实际问题的案例分析证明了算法的有效性。

1 模型建立

本文研究的是时变道路系统中危险废物回收的运输路径问题。道路拥挤程度会影响风险和运营成本,道路拥挤程度不同,事故影响的人群数量和范围就不同,从而危害后果不同,风险的大小也不同。车辆燃料消耗与交通拥堵、载重量等因素有关,因此不同时段内车辆的运营成本是不一样的。

1.1 问题描述

危险废物回收车辆路径问题是一个组合优化问题。回收危险废物车辆从处理中心出发,服务各个废物产生地(客户)后,将装载收集的危险废物运输到处理中心。危险废物处理运营商希望既能极小化运营成本又可使事故风险降到最低。本文提出的模型建立在如下假设基础之上:

- ①处理中心与客户的位置是已知的;
- ②客户的废物产出是已知的;
- ③司机非工作时间(20:00—6:00)的每小时工资高于工作时间(6:00—20:00);
- ④在同一时段内,城市交通拥堵指数 α_u 和车辆速度 v_u 是恒定的。

1.2 符号与决策变量

在本文建立的危险废物回收车辆运输路径模型中,涉及的符号与决策变量见表 1。

1.3 路径交通拥堵指数

1.3.1 基本概念

在城市交通网络中,道路系统的拥堵程度和车辆的行驶速度会随着时间发生变化。城市交通拥堵指数是综合反映道路网拥堵程度的数值性指标,它与车辆的速度及道路等级有关^[21],不同城市拥堵指数的变化规律不同。以北京市为例,北京交通发展研究院官网(<http://www.bjtrc.org.cn/>)实时更新的当天城市交通拥堵指数与速度信息显示,拥堵指数具有明显的周期性,如图 1 所示(基于 2018 年 12 月 3 日数据)。

由于城市交通拥堵指数及汽车行驶的平均速度具有周期性,根据其变化规律将一天划分为 K 个时段 T_1, T_2, \dots, T_K ,其中第 u 个时段为 $[t_{u-1}^*, t_u^*]$ 。

车辆行驶在路径 (i, j) 过程中可能跨越不同时段,而每个时段的道路拥挤程度不同,因此根据车辆

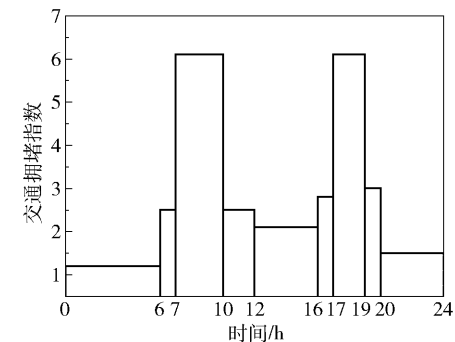
表 1 符号与决策变量说明

Table 1 Description of symbols and decision variables

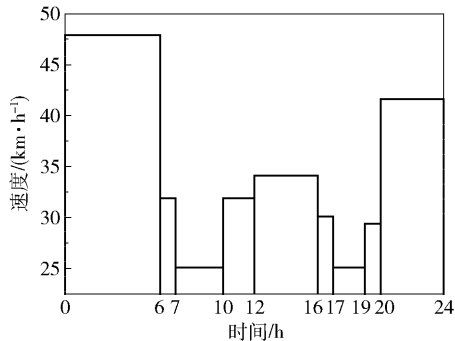
符号与决策变量	含义
n	危险废物产生地(客户)的个数
i	位置索引, $i=0, 1, \dots, n, i=0$ 时表示处理中心,其他表示客户
m	运输中的汽车使用数量($m \leq H, H$ 为车辆最大数量)
d_{ij}	客户 i 与 j 的距离
W	车辆的最大载重量
K	一天中时间段总数
u	车辆当前所处时间段($1 \leq u \leq K$)
q_i	客户 i 处废物产量
s_i	客户 i 处单位重量废物收集时间
v_u	车辆在 u 时段内的行驶速度
α_u	车辆在 u 时段内的城市交通拥堵指数
$d^*(u)$	在时间段 u 的最大行驶距离($u=1, 2, \dots, K$)
w_i	车辆离开客户 i 时的危险货物载重量
t_i	车辆离开处理中心($i=0$)或客户($i=1, 2, \dots, n$)的时间点
Δd_{ij}	在路径 (i, j) 中,车辆从 t_i 到 t_u^* 的行驶距离, $t_i \in [t_{u-1}^*, t_u^*]$
t_{ij}^u	车辆在 $t_i \in [t_{u-1}^*, t_u^*]$ 时从客户 i 出发前往客户 j ,在时间段 u 的行驶时间($u=1, 2, \dots, K$)
t_{ij}	车辆从客户 i 到客户 j 的行驶时间
t_p^*	时段的分界时刻点($p=0, 1, \dots, K$)
c_k	车辆的使用成本
c_h	司机每小时工资(非工作时间工资加倍)
c_f	燃料的单位成本
r_0	汽车空载燃料消耗率
r_*	汽车满载燃料消耗率
c_r	风险的单位成本
p_{ij}	路径 (i, j) 的事故发生概率
ρ_{ij}	路径 (i, j) 的道路人口暴露数
x_{ij}	0~1 决策变量(车辆从客户 i 到 j 时取值为 1,否则为 0)
t_0	车辆离开处理中心的时间

的行驶时间,将车辆所跨越的每个时段中城市拥堵指数的加权平均值作为该车辆通过路径 (i, j) 时的交通拥堵指数。

图 2 为路径交通拥堵指数计算方法示意图。假设车辆在第 1 时段的 $t_i \in [t_0^*, t_1^*]$ 时刻离开客户 i ,行驶 $(t_1^* - t_i)$ 时间后跨入第 2 时段,继续行驶 $(t_{ij} + t_i - t_1^*)$ 后到达客户 j ,则此车辆从客户 i 到客户 j 路



(a) 交通拥堵指数变化图



(b) 速度变化图

图1 北京市交通拥堵指数与速度信息

Fig.1 Traffic congestion index and speed information for Beijing

段上的交通拥堵指数为

$$\alpha_{ij}^1 = \frac{\alpha_1(t_1^* - t_i) + \alpha_2(t_{ij} + t_i - t_1^*)}{t_{ij}} \quad (1)$$

$$\alpha_{ij}^1 = \begin{cases} \alpha_1, \\ \frac{\alpha_1(t_1^* - t_i) + \alpha_2(t_{ij} + t_i - t_1^*)}{t_{ij}}, \\ \vdots \\ \frac{\alpha_1(t_1^* - t_i) + \sum_{u=2}^{K-2} \alpha_u(t_u^* - t_{u-1}^*) + \alpha_{K-1}(t_{ij} + t_i - t_{K-2}^*)}{t_{ij}}, \\ \frac{\alpha_1(t_1^* - t_i) + \sum_{u=2}^{K-1} \alpha_u(t_u^* - t_{u-1}^*) + \alpha_K(t_{ij} + t_i - t_{K-1}^*)}{t_{ij}}, \end{cases}$$

整理式(5)得

$$\alpha_{ij}^1 = \alpha_1 f(\Delta d_{ij} - d_{ij}) + \left(\frac{\alpha_1(t_1^* - t_i) + \alpha_2(t_{ij} + t_i - t_1^*)}{t_{ij}} \right) f[(d^*(2) + \Delta d_{ij} - d_{ij})(d_{ij} - \Delta d_{ij})] +$$

$$\sum_{w=3}^K \left(\frac{\alpha_1(t_1^* - t_i) + \sum_{u=2}^{w-1} \alpha_u(t_u^* - t_{u-1}^*) + \alpha_w(t_{ij} + t_i - t_{w-1}^*)}{t_{ij}} \right) f \left[\left(\sum_{u=2}^w d^*(u) + \Delta d_{ij} - d_{ij} \right) \right. \\ \left. \left(d_{ij} - \sum_{u=2}^{w-1} d^*(u) - \Delta d_{ij} \right) \right] \quad (6)$$

类似地,可以计算在 u 时段车辆从客户 i 出发

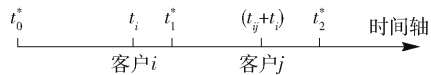


图2 拥堵指数计算示例

Fig.2 Example of a congestion index calculation

1.3.2 拥堵指数求解

在时变交通网络中,车辆从客户 i 到客户 j 的行驶时间 t_{ij} 取决于离开客户 i 的时刻 t_i 和车辆此时处于的时间段。根据文献^[16]可知,行驶时间 t_{ij} 计算如下

$$t_{ij} = \sum_{u=1}^K t_{ij}^u f[(t_u^* - t_i)(t_i - t_{u-1}^*)] \quad (2)$$

式中, t_{ij}^u 表示车辆在 $t_i \in [t_{u-1}^*, t_u^*]$ 出发后从客户 i 到客户 j 的行驶时间, $f(x)$ 为符号函数,则有

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

根据车辆在路径 (i, j) 上的行驶时间,可以计算该路径上的交通拥堵指数 α_{ij}

$$\alpha_{ij} = \sum_{u=1}^K \alpha_{ij}^u f[(t_u^* - t_i)(t_i - t_{u-1}^*)] \quad (4)$$

当车辆离开客户 i 的时刻 $t_i \in [t_0^*, t_1^*]$ (第1时段)时,由于其到达客户 j 的时刻 $(t_{ij} + t_i)$ 可以处于不同时段 $[t_{u-1}^*, t_u^*]$,故路径交通拥堵指数 α_{ij}^1 可按式(5)计算

$$d_{ij} \leq \Delta d_{ij}$$

$$\Delta d_{ij} \leq d_{ij} \leq d^*(2) + \Delta d_{ij}$$

$$\sum_{u=2}^{K-2} d^*(u) + \Delta d_{ij} \leq d_{ij} \leq \sum_{u=2}^{K-1} d^*(u) + \Delta d_{ij} \quad (5)$$

$$\sum_{u=2}^{K-1} d^*(u) + \Delta d_{ij} \leq d_{ij} \leq \sum_{u=2}^K d^*(u) + \Delta d_{ij}$$

前往客户 j 的路径交通拥堵指数 α_{ij}^u ($u = 1, 2, \dots$,

K), 最终, 根据公式(4)得出在路径(i, j)上的交通拥堵指数 α_{ij} 。

车辆离开客户 j 的时间 t_j 和载重 w_j 分别为

$$t_j = t_{ij} + t_i + q_j s_j \quad (7)$$

$$w_j = w_i + q_j \quad (8)$$

1.4 运营成本计算

车辆的运营成本包括固定成本(租车费用)、燃料成本和司机的工资成本等。单位距离的燃料消耗量与车辆的实时负载成线性相关^[22], 即装载的货物越多, 消耗的燃料量就越大; 同时燃料消耗量还与空载和满载的燃料消耗率及车辆的出行耗时有关系^[23]。

$$C_{ij} = \begin{cases} 2c_h t_{ij}, & t_i + t_{ij} < 6 \\ c_h (2(6 - t_i) + t_i + t_{ij} - 6)f(6 - t_i) + c_h t_{ij}f(t_i - 6), & 6 \leq t_i + t_{ij} \leq 20 \\ c_h (20 - t_i + 2(t_i + t_{ij} - 20))f(20 - t_i) + 2c_h t_{ij}f(t_i - 20), & 20 \leq t_i + t_{ij} \end{cases} \quad (11)$$

1.5 风险度量

风险度量是危险品运输问题中非常重要的内容, 风险度量的方式直接影响运输调度的选择。Erkut 等^[24]用后果度量风险的方式得到普遍采用, 即路径(i, j)上的风险为 $p_{ij}c_{ij}$, 其中 p_{ij} 为路径(i, j)上的事故发生概率, c_{ij} 为事故造成的后果成本。事故风险与车辆所在道路上发生事故的概率、路径长度、周围人口数量以及车辆的载重量等有关^[25]。由于时段不同, 上述与风险相关的因素都会发生变化, 故用 $g(\alpha_{ij})$ 表示这些因素带来的综合影响。车辆在路径(i, j)上的风险为

$$R_{ij} = g(\alpha_{ij})p_{ij}d_{ij}\rho_{ij}\frac{w_i}{W} \quad (12)$$

1.6 模型建立

基于路径交通拥堵指数的危险废物回收双目标车辆路径模型表示如下

$$\min Z_1 = c_k m + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_f F_{ij} x_{ij} + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n C_{ij} x_{ij} \quad (13)$$

$$\min Z_2 = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_r R_{ij} x_{ij} \quad (14)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^n x_{0j} = \sum_{i=1}^n x_{i0} = 1 \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n q_j x_{ij} \leq W \quad (17)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n x_{ij} \leq n - 1 \quad (18)$$

车辆在路径(i, j)上的燃料消耗量为

$$F_{ij} = g(\alpha_{ij}) \left(r_0 + (r_* - r_0) \frac{w_i}{W} \right) d_{ij} \quad (9)$$

由交通拥堵指数与出行耗时的关系^[21]引入分段函数 $g(x)$

$$g(x) = \begin{cases} 1, & 0 < x \leq 2 \\ 1.2 + \frac{0.3(x-2)}{3}, & 2 < x < 10 \end{cases} \quad (10)$$

综上, 车辆从客户 i 到客户 j 的燃料成本为 $F_{ij}c_f$ 。

司机的工资取决于其在正常和非正常时段工作时间的长短, 所以车辆从客户 i 到客户 j 的工资成本为

$$x_{ij} = 1 \text{ 或 } 0 \quad (19)$$

式中, Z_1 代表成本, Z_2 代表风险, $c_k m$ 是固定成本,

$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_f F_{ij} x_{ij}$ 是燃料成本, $\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n C_{ij} x_{ij}$ 是司机工资成本。约束式(15)保证每辆汽车从处理中心出发并回到处理中心, 约束式(16)保证每个客户只能被 1 辆车访问 1 次, 式(17)是车辆的载重约束, 约束式(18)保证不会产生子环。

通过一个简单的案例说明引入交通拥堵指数的必要性和重要性, 如图 3 所示。假设车辆从处理中心 A 出发, 将客户 B、C 和 D 的废物运回处理中心。用向量 $\theta = (d^*, \rho^*, \alpha^*)$ 描述路径间的距离、人口暴露数和交通拥堵指数, B、C 和 D 的危险废物产量分别为 20、40 和 20。表 2 和表 3 给出了不同度量方式下不同路径的成本和风险。不考虑交通拥堵指数时, 最小成本和风险的路径为 ABCDA (路线一) 或 ADCBA (路线二), 考虑交通拥堵指数后, 最小成本

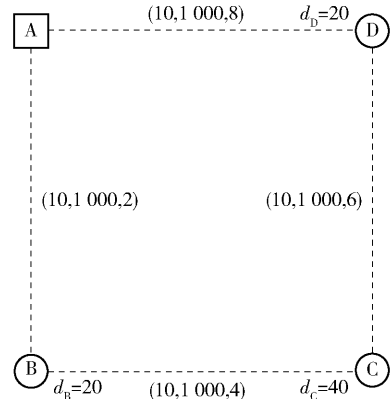


图 3 简单案例

Fig. 3 A simple case

和风险路径为 ADCBA, 路径 ABCDA 不再是最优路径。由此可见, 基于交通拥堵指数的风险和成本度量方式可更加合理地反映实际情况, 帮助决策者有效识别最优路径。

表 2 燃料消耗成本比较

计算公式	路线一 的成本	路线二 的成本	最小成 本路线
$\left(r_0 + (r_* - r_0) \frac{w_i}{W}\right) d_{ij}$	95.6	95.6	路线一或 路线二
$g(\alpha_{ij}) \left(r_0 + (r_* - r_0) \frac{w_i}{W}\right) d_{ij}$	139.9	137.3	路线二

表 3 风险比较

计算公式	路线一的 风险	路线二的 风险	最小风 险路线
$p_{ij} d_{ij} \rho_{ij} \frac{w_i}{W}$	552.5	552.5	路线一或 路线二
$g(\alpha_{ij}) p_{ij} d_{ij} \rho_{ij} \frac{w_i}{W}$	925.4	676.8	路线二

2 改进的蚁群算法

蚁群算法是 20 世界 90 年代提出的一种新的智能优化算法^[26], 目前已应用在物流等众多领域中。本文对蚁群算法进行了改进, 使其适用于求解本文建立的新模型。

2.1 转移概率

本文提出的废物回收车辆路径问题是双目标优化模型, 路径的选择不仅与路径长度有关, 还与路径上的风险有关。由于路径上人口密度越大, 事故后果就越大, 因此路径上的启发式因子 η_{ij} 与路径长度 d_{ij} 和人口密度 ρ_{ij} 成反比。转移概率公式更新如下

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \frac{1}{\rho_{ij}} \tag{20}$$

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{s \in J} [\tau_{is}]^\alpha [\eta_{is}]^\beta}, & \text{if } j \in J \\ 0, & \text{else} \end{cases} \tag{21}$$

式中, τ_{ij} 表示路径 (i, j) 上的信息素强度, s 为可访问的客户, J 为可访问客户集合, 信息素强度越高、启发式因子越大 (客户 i 到 j 的距离近且人口暴露数小), 转移的概率就会越高; α, β 分别代表它们的重要程度。

2.2 信息素

考虑到模型的特点, 路径的选择不仅与费用有关, 还与风险有关, 信息素公式更新如下

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho_k) \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t) \tag{22}$$

$$\Delta \tau_{ij} = \begin{cases} \frac{Q}{R^\lambda C^\mu}, & \text{if 蚂蚁通过}(i, j) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \tag{23}$$

$$\lambda + \mu = 1 \tag{24}$$

式中, $\tau_{ij}(t)$ 表示当前迭代信息素强度; ρ_k 表示信息素挥发系数; $\Delta \tau_{ij}$ 表示迭代中信息素的增量; R 和 C 分别是风险和成本的目标函数值; λ 和 μ 表示每个目标函数的偏好程度, 用于调节风险对信息素的影响, 当 μ 接近 0 时, 成本对信息素的影响很小, 当 μ 接近 1 时, 成本的影响起主导作用。

2.3 算法流程

本文对转移概率和信息素更新公式进行了改进, 改进之后的蚁群算法流程图见图 4。

3 案例分析

本文以汽车 4S 店危险废物回收问题为案例进行了实证分析。在对某环保技术有限责任公司调研中发现, 随着民用汽车保有量的不断增加, 汽车维修保养过程中产生的危险废物也不断增多, 其危害性正在逐步凸显。同时汽车 4S 店在市区分布较密集, 单个店产生的废物量不多, 所以其废物回收运输路径问题是 HVRP。

3.1 参数设定

本模型中的参数^[27-28]设定如下: 每辆车的租用成本 200 元/(辆·天), 单位排放成本 80 元/t, 司机工资 25 元/h, 事故概率为 $10^{-6} d_{ij}$, 空载和满载的燃料消耗率分别为 $r_0 = 0.296$ 和 $r_* = 0.39$, 单位风险成本 $c_r = 6906$ 。

改进蚁群算法的参数设定为: 最大迭代次数 500, 种群大小 100, $\alpha = 1, \beta = 2, \rho_k = 0.1, Q = 1, \mu = \lambda = 0.5$ 。

本文所有实验结果均在 Windows 7 系统、4 GB 内存、3.4 GHz 频率的计算机上运行 Python 得到。

3.2 计算结果及分析

以北京市某环保技术有限责任公司 (处理中心) 和其服务的 20 家汽车维修店 (4S 店) 为背景, 讨论并比较了不同车辆使用模式下的决策方案。公司位置 (20) 及 4S 店位置 (0-19) 见图 5, 相互距离数据来自百度地图, 城市交通拥堵指数、速度与人口密

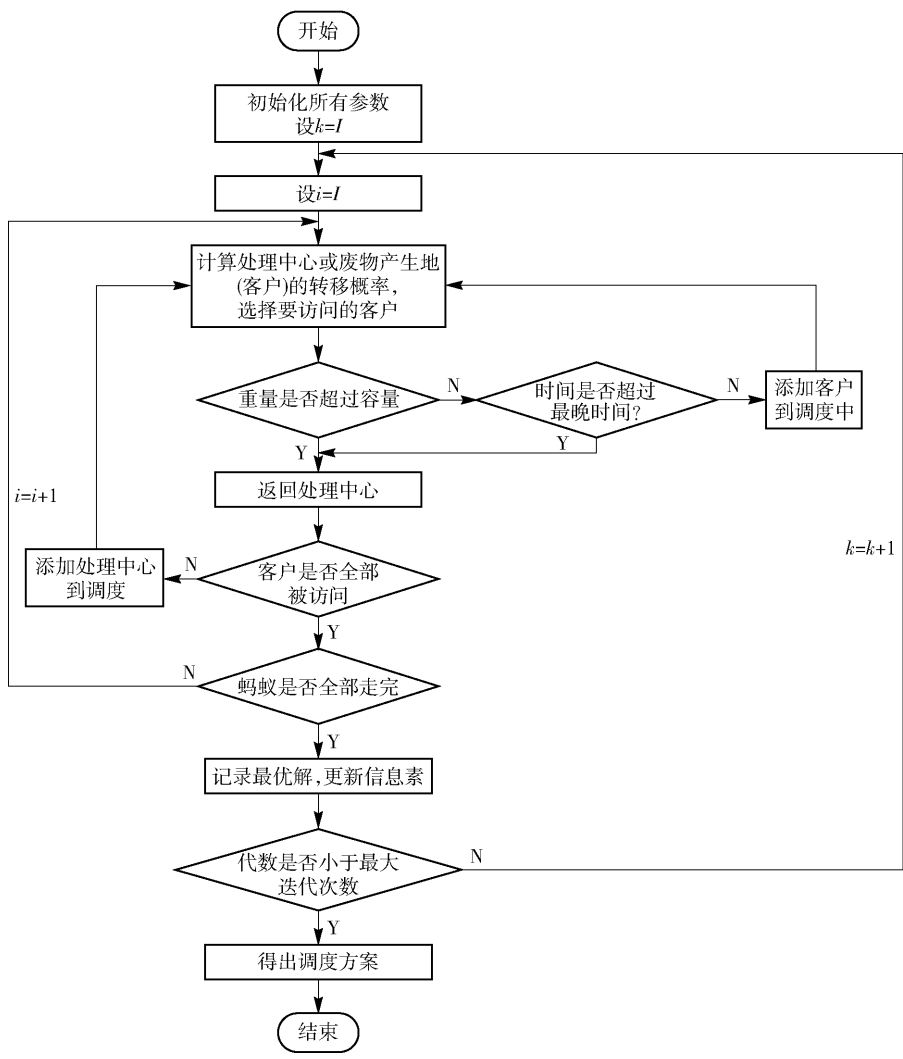


图 4 改进的蚁群算法流程图

Fig. 4 Improved ant colony algorithm flow

度的数据收集于北京市交通研究院官网,废物量随机生成。

考虑 2 种车辆使用模式。模式一:公司租用多辆车,车辆同时从处理中心出发,一天发车 1 次。模式二:公司租用 1 辆或多辆车,一天内发车多次。

模式一中 0:00 出发的情况下,算法改进前后的运行结果如图 6 所示。显然,无论是目标函数值还是算法的效率,改进后的算法都优于原算法。

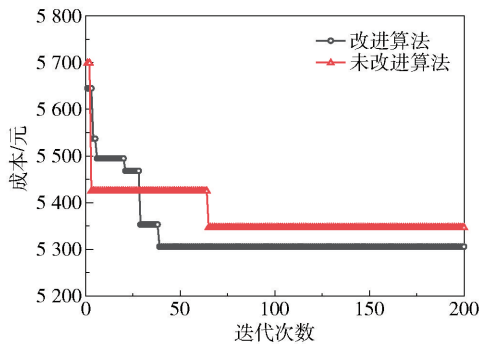
在模式一下分别计算 0:00、8:00 和 10:00 出发的帕累托最优曲线,结果如图 7 所示。可以看出同等风险下 10:00 出发的调度方案成本小于 0:00、8:00,因为该时间段内工资水平和道路拥堵程度都较低,但风险最小的方案出现于 0:00 出发的模式中;8:00 出发的调度方案中既不存在风险最低也不存在成本最小的方案,原因在于汽车运行期间正好



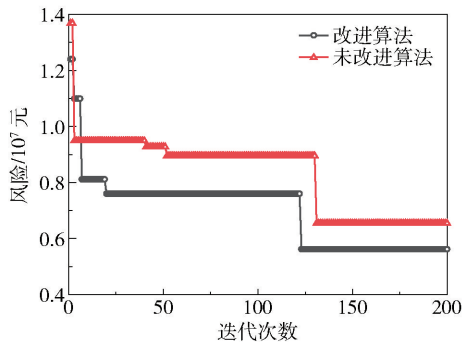
图 5 处理中心与 4S 店的位置

Fig. 5 Location of the processing center and 4S shop
跨越了早高峰时段,导致成本增加。

在模式二中,由于 0:00 和 5:00 出发的时间早,完成全部回收只需 1 辆车,而其他时间点出发则需



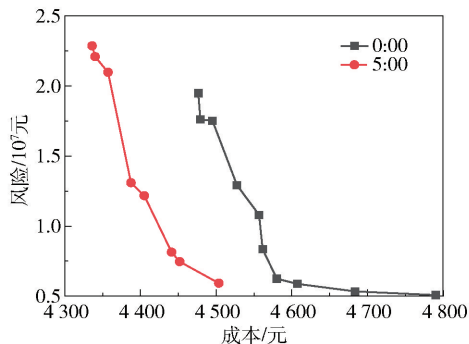
(a) 成本随迭代次数的变化



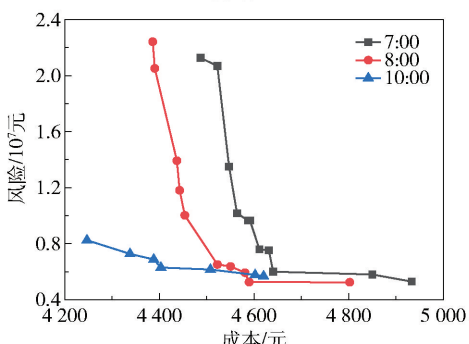
(b) 风险随迭代次数的变化

图 6 成本与风险随迭代次数的变化

Fig. 6 Variation in cost and risk with number of iterations



(a) 情况①



(b) 情况②

图 8 模式二下不同情况的帕累托最优曲线

Fig. 8 Pareto optimal curves for different situations in mode II

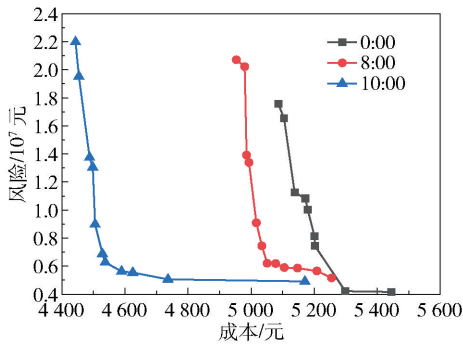


图 7 模式一下不同时刻出发的帕累托最优曲线

Fig. 7 Pareto optimal curves starting at different times in mode I

要 2 辆车。因此在模式二下分两种情况讨论：①1 辆车运完；②2 辆车运完。模式二的帕累托最优曲线如图 8 所示。可以看出，情况①中，相同风险条件下 5:00 出发的行车方案成本低于 0:00 出发，其原因是司机在不同时段的工资不同。情况②中风险相同时，成本从 10:00、8:00、7:00 逐渐提高，因为 8:00 有 2 个拥堵高峰，成本高于 10:00，7:00 拥堵高峰时间长，成本高于 8:00。

在图 8(b)中，选择 7:00 和 10:00 出发的最小路径所对应的行车方案，对其燃料消耗成本进行比

较，结果表明 7:00 出发的行车路径长度为 508.26 km，燃料消耗成本为 1 847.48 元；而 10:00 出发的行车路径长度为 513.76 km，燃料消耗成本为 1 720.90 元，说明最短路径下不一定能耗最小，原因是出发时间及路途中的重量变化对能耗也有影响。

最后，比较相同出发时间下模式一与模式二的帕累托最优解（图 9），可以发现，模式一比模式二在 0:00、10:00 存在多个风险更小的回收路径。

综合以上分析可以得出，所有废物回收路径中，最小成本（模式二，10:00）和最小风险（模式一，0:00）的路线如表 4、5 所示。

4 结论

（1）在时变道路系统中，引入路径交通拥堵指数对风险和成本进行度量，并考虑司机工资等成本随时间变化等因素，建立了更贴合实际的双目标危险废物回收模型，同时对传统蚁群算法中启发式因子和信息素的更新公式进行了改进。数值实验表明改进算法可以更快地得到问题的帕累托最优曲线。

（2）案例分析结果表明，出发时间和车辆使用模式对帕累托最优曲线有显著影响，最短路径不一

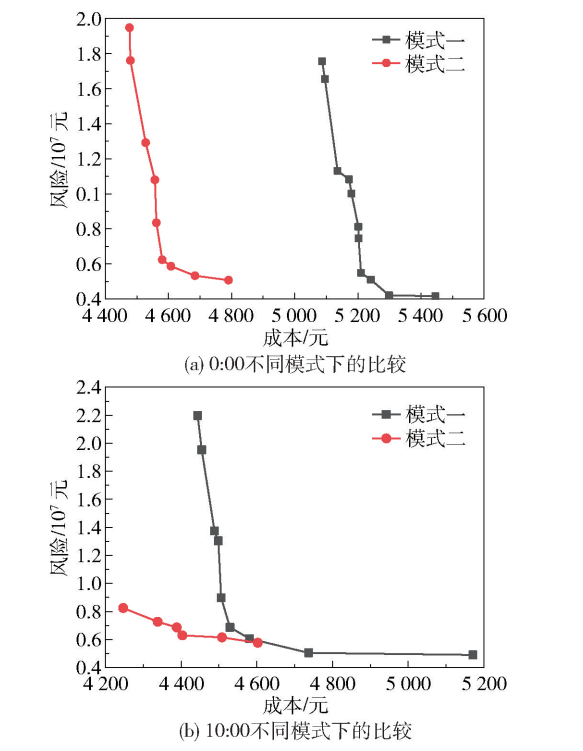


图9 不同时间点模式一、二的帕累托最优曲线比较
Fig.9 Comparison of Pareto optimal curves for modes I and II at different time points

表4 最小成本调度方案(模式二,10:00)
Table 4 Minimum cost scheduling plan (mode II, 10:00)

车辆	出发时间	路线
1	10:00	12-2-13-1
1	13:01	17-11-7-3-8
2	10:00	14-5-9-6-10-15-18
2	14:19	16-0-19-4

表5 最小风险调度方案(模式一,0:00)
Table 5 Minimum risk scheduling plan (mode I, 0:00)

车辆	出发时间	路线
1	0:00	2-3-1-13-12
2	0:00	17-11-7-16-9
3	0:00	10-6-4-5-14-8
4	0:00	19-0-15-18

定是耗能最少的路线,同一出发时间和同等风险下模式二比模式一成本小。

在今后的研究中,将从下面两个方面完善模型:①考虑更大规模的废物回收路径问题,租用载重量不同的运输车辆等;②考虑绿色废物回收路径问题。

参考文献:

[1] 国务院公报 2016 年第 26 号[EB/OL]. [2019-05-29]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5109323.htm.
State council bulletin No. 26 of 2016[EB/OL]. [2019-05-29]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5109323.htm. (in Chinese)

[2] 前瞻产业研究院. 危险废物产量逐年增长,危废处理行业潜力巨大[EB/OL]. [2017-05-26]. <https://bg.qianzhan.com/report/detail/459/170526-af2db9fd.html>.
Prospective Industry Research Institute. The production of hazardous waste is increasing year by year, the potential of hazardous waste treatment industry is huge [EB/OL]. [2017-05-26]. <https://bg.qianzhan.com/report/detail/459/170526-af2db9fd.html>. (in Chinese)

[3] BATTAR, CHIU S S. Optimal obnoxious paths on a network: transportation of hazardous materials[J]. Operations Research, 1988, 36(1): 84-92.

[4] ERKUT E, INGOLFSSON A. Catastrophe avoidance models for hazardous materials route planning[J]. Transportation Science, 2000, 34(2): 165-179.

[5] VERMA M, VERTER V. Railroad transportation of dangerous goods: population exposure to airborne toxins[J]. Computers and Operations Research, 2007, 34: 1287-1303.

[6] DANTZIG G B, RAMSER J H. The truck dispatching problem[J]. Management Science, 1959, 6(1): 80-91.

[7] QIAN J N, EGLESE R. Fuel emissions optimization in vehicle routing problems with time-varying speeds[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 248: 840-848.

[8] WANG Y, MA X L, LAO Y T, et al. A fuzzy-based customer clustering approach with hierarchical structure for logistics network optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(2): 521-534.

[9] ROPKE S, PISINGER D. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows[J]. Transportation Science, 2006, 40(4): 455-472.

[10] WAN WOENSEL T, KERBACHE L, PREMANS H, et al. Vehicle routing with dynamic travel times: a queueing approach[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 186: 990-1007.

[11] WEN L, ÇATAY B, EGLESE R. Finding a minimum

- cost path between a pair of nodes in a time-varying road network with a congestion charge[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 236: 915–923.
- [12] MADEN W, EGLESE R, BLACK D. Vehicle routing and scheduling with time-varying data: a case study[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2010, 61(3): 515–522.
- [13] 赵晓煌, 彭萍. 带有模糊参数的电子废弃物回收网络优化设计模型[J]. *工业工程*, 2007, 10(3): 62–66.
ZHAO X H, PENG P. Optimization with fuzzy parameters for recycling network of waste electronic appliances [J]. *Industrial Engineering Journal*, 2007, 10(3): 62–66. (in Chinese)
- [14] 魏航, 李军, 蒲云. 时变条件下有害物品运输的路径问题研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2006(10): 107–112.
WEI H, LI J, PU Y. Route planning for hazardous materials transportation in time-varying network[J]. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2006(10): 107–112. (in Chinese)
- [15] 魏航, 李军, 魏洁. 时变条件下有宵禁限制的有害物品运输最短路研究[J]. *管理工程学报*, 2007, 21(3): 79–84.
WEI H, LI J, WEI J. An approach for hazardous materials transportation path problem in the time-varying network curfews[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2007, 21(3): 79–84. (in Chinese)
- [16] HU H, GUO S N, MA H G, et al. A credibilistic mixed integer programming model for time-dependent hazardous materials vehicle routing problem[J]. *Journal of Uncertain Systems*. 2017, 11(3): 163–175.
- [17] PRADHANANGA R, TANIGUCHI E, YAMADA T. Ant colony system based routing and scheduling for hazardous material transportation[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2010, 2(3): 6097–6108.
- [18] PRADHANANGA R, TANIGUCHI E, YAMADA T, et al. Bi-objective decision support system for routing and scheduling of hazardous materials[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2014, 48(2): 135–148.
- [19] 袁文燕, 徐腾飞, 杨丰梅, 等. 基于新风险度量方式的危险品车辆路径双目标优化模型[J]. *数学的实践与认识*, 2016, 46(14): 275–284.
YUAN W Y, XU T F, YANG F M, et al. Bi-objective decision model for vehicle routing of hazardous material based on new risk measure[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2016, 46(14): 275–284. (in Chinese)
- [20] 张祎. 基于交通指数的上海城市快速路网常发性拥堵时变特征分析[J]. *交通运输*, 2017(12): 22–26.
ZHANG W. Time-varying characteristics of frequent congestion of Shanghai urban expressway network based on traffic performance index data[J]. *Traffic & Transportation*, 2017(12): 22–26. (in Chinese)
- [21] 梁振球. 基于拥堵指数的改进蜂群算法在 DVRP 中的应用[J]. *计算机系统应用*, 2015, 24(9): 252–255.
LIANG Z Q. Application of improved bee colony algorithm based on congestion factor to the DVRP[J]. *Computer System Application*, 2015, 24(9): 252–255. (in Chinese)
- [22] ZHANG S Z, LEE C K M, CHOY K L, et al. Design and development of a hybrid artificial bee colony algorithm for the environmental vehicle routing problem[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 31: 85–99.
- [23] 张传琪, 张杨. 动态路网下多车型车辆路径问题研究[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2017, 15(2): 112–118.
ZHANG C Q, ZHANG Y. Study on vehicle route problem under dynamic road system[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2017, 15(2): 112–118. (in Chinese)
- [24] ERKUT E, INGOLFSSON A. Transport risk models for hazardous materials: revisited[J]. *Operations Research Letters*, 2005, 33(1): 81–89.
- [25] YUAN W Y, WANG J, LI J, et al. Two-stage heuristic algorithm for a new model of hazardous material multi-depot vehicle routing problem[M]//*Advances in Computational Intelligence Systems*. New York: Springer, 2017: 362–366.
- [26] DORIGO M, GAMBARDELLA L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1): 53–66.
- [27] ZHANG D Z, WANG X, LI S Y, et al. Joint optimization of green vehicle scheduling and routing problem with time-varying speeds[J]. *PLoS One*, 2018(2): 1–20.
- [28] 2019 年北京市薪水水平报告[DS/OL]. [2019-06-02]. <http://salarycalculator.sinaapp.com/report/北京>.
Beijing salary level report for 2019[DS/OL]. [2019-06-02]. <http://salarycalculator.sinaapp.com/report/Beijing>. (in Chinese)

A hazardous waste recycling model based on a route traffic congestion index

YUAN WenYan¹ WANG QingBo¹ WU Jun² LI Jian^{3*}

(1. College of Mathematics and Physics, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. College of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

3. Research Base of Beijing Modern Manufacturing Development, College of Economics and Management, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In an attempt to understand the impact of traffic congestion on the cost and risk of hazardous waste transportation, a route traffic congestion index is introduced in this paper, and a double-objective optimization model of hazardous waste recovery based on the traffic congestion index in a time-dependent road system is established. The formula for calculation of heuristic factors in a traditional ant colony algorithm is also improved, and the improved ant colony algorithm is used to solve the model. Finally, a case study was carried out on hazardous waste recycling in an environmental protection company. The results show that different departure times and vehicle usage patterns have a significant impact on the Pareto optimal solution and the shortest route does not necessarily involve the lowest energy consumption. The models and algorithms proposed in this paper can assist in the development of more efficient scheduling schemes.

Key words: hazardous waste; traffic congestion index; time-dependent speed; Pareto optimal curve; ant colony algorithm

(责任编辑:汪 琴)