

再生资源回收物流网络优化模型与算法研究*

雷定猷¹, 汤波¹, 王娟¹, 杨威²

(1. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075; 2. 广深铁路股份有限公司 棠溪站, 广州 510619)

摘要: 再生资源回收利用是发展循环经济的有机组成部分, 再生资源回收物流网络规划问题的研究是再生资源回收利用系统运行的前提与基础。在考虑再生资源回收量和需求量波动性的基础上, 以最小化回收物流总成本为优化目标, 构建具有回收点、回收中心、集散市场和深加工中心或客户的四层级、多品种单周期再生资源回收物流网络规划模型。采用基于回收主体综合处理能力及映射关系的解改进优化策略, 设计两阶段启发式算法求解模型。算例表明, 提出的模型与算法能有效制定再生资源回收物流网络布局方案, 且可推广用于单品种单周期、单品种多周期、多品种多周期的再生资源回收物流网络优化问题。

关键词: 再生资源; 回收物流; 多品种单周期; 网络优化

中图分类号: F540.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)06-2093-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.06.023

Research on optimal model and algorithm for recycling logistics network planning of renewable resources

LEI Ding-you¹, TANG Bo¹, WANG Juan¹, YANG Wei²

(1. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Tangxi Railway Station, Guangzhou-Shenzhen Railway Co., Ltd, Guangzhou 510619, China)

Abstract: Recycling of renewable resources is an integral part of the recycling economy. Research on the network planning of renewable resources recycling logistics is the prerequisite and foundation of recycling of renewable resources system. Given the amount of renewable resources and demand volatility, taking the minimal total logistics costs as optimal objective, this paper built the four-level, multi-species single-cycle model of network planning of renewable resources which included recycling point, recycling centers, processing centers and deep-processing markets or customer enterprises. Based on optimization strategies of recycling centers' main processing power and mapping relationship, it designed a two-stage heuristic algorithm to solve the model. The example shows the proposed model and algorithm can develop an effective recycling logistics network planning of renewable resources. It can also be used to solve the optimal problems of single-species single-cycle, single-species multi-cycle, multi-species multi-cycle renewable resource recycling logistics network.

Key words: renewable resources; recycling logistics; multi-species single-cycle; network optimizing

0 引言

循环经济是一种最大限度地利用资源和保护环境的发展模式。再生资源回收利用和发展循环经济的有机组成部分, 而再生资源回收物流网络规划是整个再生资源回收利用系统运行的前提和基础。在国家发展循环经济、加强资源节约、环境保护建设的大背景下, 再生资源回收物流网络优化研究具有较强的现实意义与理论参考价值。

国内外学者对回收物流网络规划问题进行了大量的基础研究。国外既有研究主要通过分析回收物流网络规划的成本效益^[1], 构建混合整数规划^[2]、随机规划^[3]等模型, 研究有毒废料^[3-5]、建筑用混凝土^[2]等具体物品回收网络规划问题, 对再生资源回收物流网络规划的相关研究甚少。Pishvae等人^[6]指出此类问题是一个 NP-hard 问题, 一般采用遗传、模拟退火等启发式算法进行求解。国内学者专家对回收物流库

存方面的研究较多^[7,8], 其网络规划问题的研究主要集中在固体废弃物物流^[9]和企业逆向物流^[10]两个方面。

总的来说, 国内外既有研究工作主要体现在几个方面:

a) 既有研究一般局限在再生资源回收利用行业立法、政策制度等宏观、定性的研究, 尚未深入至再生资源回收物流的纵深面, 缺乏对再生资源回收物流体系的系统研究。

b) 回收物流与逆向物流两者概念混淆不清, 多数文献将其混为一谈。本文认为, 回收物流偏向于社会物资的回收过程; 逆向物流则偏向于企业退货等与企业正向物流相对的物资流动。

c) 回收物流网络规划模型的构建尚处在较浅层次, 模型结构及考虑因素较简单, 算法研究甚少, 往往使用 Lindo/Lingo 软件求解, 无法保证有效解决大规模、复杂网络规划问题, 且多数研究成果基于将回收物品的时间、数量、质量等视为确定性因素, 与实际不符。

收稿日期: 2011-10-21; **修回日期:** 2011-11-30 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(70971140)

作者简介: 雷定猷(1958-), 男, 湖南浏阳人, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为交通运输营运管理及优化等(leidingyou@sina.com); 汤波(1984-), 男, 湖南浏阳人, 博士研究生, 主要研究方向为交通运输营运管理及优化; 王娟(1983-), 女, 湖南邵阳人, 博士研究生, 主要研究方向为现代物流与交通运输发展、循环经济; 杨威(1981-), 男, 湖南洞口人, 工学学士, 主要研究方向为运输管理。

回收物流与网络规划问题的相关研究成果有利于较好解决再生资源回收物流网络优化问题。但再生资源源于生产和生活的各个领域,具有社会性、种类繁多、来源广泛、越级回收、流程复杂多变等特征;逆向物流则主要依赖现有销售网络形成,再生资源回收物流与逆向物流网络在结构上有所不同。鉴于其与废弃物物流、逆向物流的不同特点,需要对再生资源回收物流网络规划问题展开全面深入系统的研究,以期对再生资源回收物流网络规划设计提供决策参考。

1 问题分析

再生资源回收物流是以第三方回收企业或个人为主体,针对再生资源(如废机电设备及其零部件、废钢铁、废纸、废玻璃等)进行回收的过程中产生的物流活动。

目前,我国大部分再生资源回收的物流企业及回收个人基本离不开收购—初加工—转卖的类型,回收物流的操作以手工操作、买卖废卖为主,尚未形成完善的体系。再生资源回收物流网络体系通常可分为回收点、回收中心、集散市场和深加工中心(以再生资源为原材料的企业,以下简称客户)四个层级。再生资源回收物流网络优化力求再生资源回收物流总成本最小,其作业成本构成如图 1 所示。

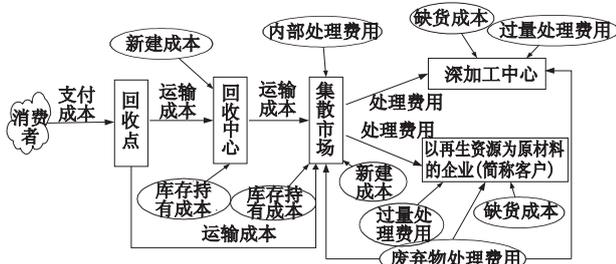


图1 再生资源回收主体及成本构成

结合再生资源回收物流网络体系及再生资源回收过程,综合考虑再生资源回收量和需求量的随机性、再生资源回收物流作业环节及其成本构成,以多品种单周期回收物流网络优化问题为研究对象,构建再生资源回收物流网络优化模型,设计相应的启发式算法进行求解,以便快速有效地制定再生资源回收物流网络布局优化方案,最小化再生资源回收物流的总成本。

2 模型建立

不妨设再生资源回收物流的回收主体集合 $S = S_{rp} \cup S_{rc} \cup S_{urc} \cup S_m \cup S_{um} \cup S_{fp}$, 表示由再生资源回收点 i 构成的集合 S_{rp} 、既有回收中心 j 构成的组合集合 S_{rc} 、备选回收中心 a 构成的集合 S_{urc} 、既有集散市场 k 构成的集合 S_m 、备选集散市场 b 构成的集合 S_{um} 以及由深加工与废弃物处理中心、客户构成的集合 S_{fp} ; 新建回收中心 a' 和集散市场 b' 的固定成本分别为 $F_{a'}$ 、 $F_{b'}$, 考虑各回收主体之间的多品种再生资源(t)的 OD 分配信息, 构建基于 OD 流的三维参数矩阵, 如图 2 所示。

图 2 中, 数字表示参数矩阵的类型, 空白处表示两者之间无直接业务往来, 引用现代排序理论中机器与工件之间的映射关系的概念, J -mapping 表示不同回收主体之间的业务映射关系。1 表示含有三个参数 $\begin{pmatrix} - & S_{it} \\ c_{it} & u_{it} \end{pmatrix}$, 其中 S_{it} 、 c_{it} 、 u_{it} 分别表示回收主体(为回收点 i)对再生资源 t (品类)的回收量(随机变

量)、最大处理能力、回收单价。2(或 2')中含有的参数矩阵 $\begin{pmatrix} x_{ss't} & \tau_{ss't} \\ c_{s't} & u_{s't} \end{pmatrix}$ (或 $\begin{pmatrix} x_{ss't} & \tau_{ss't} \\ c_{st} & u_{st} \end{pmatrix}$) 分别表示不同回收主体之间关于再生资源 t 的流量($x_{ss't}$)、单位运输成本($\tau_{ss't}$)以及回收主体对 t 的最大处理能力($c_{s't}$)、单位库存持有成本($u_{s't}$)。3(3')中含

有的参数矩阵 $\begin{pmatrix} \alpha_t & \alpha_{k(b)t} & \tau_{at} & - & - & - \\ \gamma_t & \gamma_{k(b)t} & \tau_{k(b)\gamma t} & Q_{\gamma t} & M_{\gamma t} & D_{\gamma t} \\ \delta_t & \delta_{k(b)t} & \tau_{k(b)\delta t} & Q_{\delta t} & M_{\delta t} & D_{\delta t} \end{pmatrix}$, 第一个行

向量表示与废弃物处理中心有关的参数, 依次为再生资源 t 由集散市场至废弃物处理中心的总直接废弃率、既有(备选)市场直接废弃率、废弃物处理成本(含运输成本); 第二、三个行向量分别表示与深加工处理中心、客户有关的参数, 依次为再生资源 t 在相关主体之间 OD 流的总供应率、既有(备选)市场供应率、单位处理成本(含运输成本)、供应不足引起的单位惩罚成本、供应过剩引起的额外单位处理成本、需求量(随机变量)。4 中仅含有一个参数 β_t , 表示再生资源 t 经深加工处理中心处理引起的间接废弃率。

由图 2 可知, 若 $\sum_{s'} x_{ss't} = 0 (s \in S_{urc} \text{ or } s \in S_{um})$, 表示备选回收中心或集散市场 s 未选中, 反之则被选中。因此, 令 $z_s = (\text{int})(\sum_{s'} x_{ss't}) / (\sum_{s'} x_{ss't} - 0.001)$, 用于表示备选回收中心或集散市场 s 是否被选中, 取值为 0 时表示未被选中, 否则表示选中。

以最小化回收物流总成本为优化目标, 构建具有回收点、回收中心、集散市场和深加工中心或客户的四层级、多品种单周期再生资源回收物流网络优化模型, 即

$$\begin{aligned} \min F = & \sum_{\forall t} \sum_{i \in S_{rp}} u_{it} S_{it} + \sum_{\forall t} \sum_{s \in S_{rc} \cup S_{urc} \cup S_{fp}} (u_{st} \sum_{s'} x_{ss't}) + \\ & \sum_{\forall t} \sum_{s, s' \in S_{urc} \cup S_{um}} x_{ss't} \tau_{ss't} + \sum_{s \in S_{urc} \cup S_{um}} z_s F_s + \\ & \sum_{\forall t} \sum_{s \in S_m \cup S_{um}} ((\sum_{j \in S_{rc}} x_{jst} + \sum_{a \in S_{urc}} x_{ast} + \sum_{i \in S_{rp}} x_{ist}) (\gamma_{st} \tau_{s\gamma t} + \delta_{st} \tau_{s\delta t})) + \\ & \sum_{\forall t} (\tau_{at} (\alpha_t + \beta_t \gamma_t) \sum_{i \in S_{rp}} S_{it}) + \\ & \sum_{\forall t} (Q_{\gamma t} \max(0, D_{\gamma t} - \gamma_t \sum_{i \in S_{rp}} S_{it}) + M_{\gamma t} \max(0, \gamma_t \sum_{i \in S_{rp}} S_{it} - D_{\gamma t})) + \\ & \sum_{\forall t} (Q_{\delta t} \max(0, D_{\delta t} - \delta_t \sum_{i \in S_{rp}} S_{it}) + M_{\delta t} \max(0, \delta_t \sum_{i \in S_{rp}} S_{it} - D_{\delta t})) \end{aligned} \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{s \in S_{rc} \cup S_{urc} \cup S_{fp}} x_{ist} = S_{it} \quad i \in S_{rp}, \forall t \quad (2)$$

$$\sum_{\forall i} x_{ist} = \sum_{s' \in S_m \cup S_{um}} x_{ss't} \quad \forall s \in S_{rc} \cup S_{urc}, \forall t \quad (3)$$

$$\sum_{\forall i} \sum_{s \in S_{rc} \cup S_{urc} \cup S_{fp}} x_{ist} = \sum_{\forall i} S_{it} \quad \forall t \quad (4)$$

$$\sum_{\forall i} \sum_{s \in S_{rc} \cup S_{urc}} x_{ist} = \sum_{s \in S_{rc} \cup S_{urc}} \sum_{s' \in S_m \cup S_{um}} x_{ss't} \quad \forall t \quad (5)$$

$$\alpha_{st} + \gamma_{st} + \delta_{st} = 1 \quad s \in S_m \cup S_{um} \quad \forall t \quad (6)$$

$$S_{it} \leq C_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (7)$$

$$\sum_{\forall i} x_{ist} \leq C_{st} \quad s \in S_{rc} \cup S_{urc} \quad \forall t \quad (8)$$

$$\sum_{\forall s \in S_{rc} \cup S_{urc}} x_{ss't} \leq C_{s't} \quad \forall s' \in S_m \cup S_{um} \quad \forall t \quad (9)$$

$$\alpha_t \sum_{\forall i} S_{it} = \sum_{s \in S_m \cup S_{um}} \alpha_{st} (\sum_{s' \in S_{rc} \cup S_{urc}} x_{s'st}) \quad \forall t \quad (10)$$

$$\gamma_t \sum_{\forall i} S_{it} = \sum_{s \in S_m \cup S_{um}} \gamma_{st} (\sum_{s' \in S_{rc} \cup S_{urc}} x_{s'st}) \quad \forall t \quad (11)$$

$$\delta_t \sum_{\forall i} S_{it} = \sum_{s \in S_m \cup S_{um}} \delta_{st} (\sum_{s' \in S_{rc} \cup S_{urc}} x_{s'st}) \quad \forall t \quad (12)$$

$$J\text{-mapping}, x_{ss't} \geq 0 \quad (13)$$

其中: 式(1)表示最小化回收物流总成本(包括再生资源回收成本、库存持有成本、各节点之间运输成本、新建设施固定成本、集散市场的内部处理费用、废弃物处理成本、深加工中心及客户缺货成本和过量处理成本)为优化目标函数; 式(2)表示再生资源 t 在回收点的流入流出平衡约束; 式(3)表示再生资

源 t 在既有和备选回收中心的流入流出平衡约束;式(4)表示再生资源 t 在各个回收点的回收总量流入流出平衡约束;式(5)表示再生资源 t 在各个回收中心的回收总量流入流出平衡约束;式(6)表示再生资源 t 在既有和备选集散市场的流入流出平衡约束;式(7)~(9)分别表示每个回收点、回收中心、集散市场对再生资源 t 的最大处理能力约束;式(10)~(12)分别表示再生资源 t 运至废弃物处理中心的总直接废弃率、运至深加工处理中心的总比率、运至客户的总供应率的数值约束;式(13)表示各回收主体之间的业务映射关系以及变量的非负约束。

3 算法设计

采用统计学方法,将多品种物品回收物流网络模型转换成期望值模型(以期望值代替相应的随机变量),设计相应的两阶段启发式算法求解该模型。其算法思想大致如下:首先给定备选回收中心和备选集散市场,合理分配各回收点、回收中心及集散市场之间的 OD 流,制定再生资源回收物流网络布局初始方案;在此基础上,结合再生资源回收物流网络体系中的各回收主体之间的映射关系,设计解改进优化策略,调整初始方案并制定再生资源回收物流网络布局优化方案。

3.1 第一阶段——初始算法

a) 初始化。输入再生资源回收物流网络体系中回收点、回收中心、集散市场等各回收主体对各类再生资源的最大处理能力、各回收主体之间的运输成本、新建设施固定成本、集散市场的内部处理费用等参数,并统计再生资源回收量和需求量,计算其数学期望值。

b) 循环开始。从备选回收中心集合 S_{urc} 和备选集散市场 S_{um} 中选取指定数量的备选回收中心 a 和备选集散市场 b 。对再生资源物品种类 t 开始循环,即 $t = 1$ 。

c) 各回收主体间的 OD 流分配。按照回收点与回收中心、回收点与集散市场、回收中心与集散市场等各回收主体之间的业务映射关系 J -mapping,合理分配在回收点与回收中心、回收点与集散市场、回收中心与集散市场之间再生资源 t 的 OD 流以及再生资源 t 由各集散市场至客户、深加工和废弃物处理中心的 OD 流量。

d) 循环终止条件判断。分配下一品类再生资源在网络中的 OD 流, $t = t + 1$ 。若再生资源种类循环完毕,转步骤 e);否则转步骤 c)。

e) 第一阶段结束。统计再生资源各回收主体之间的 OD 流分配、回收中心和集散市场的建设和覆盖情况及总成本,输出再生资源回收物流网络布局初始方案。

3.2 第二阶段——调整优化算法

a) 初始化及接收第一阶段计算结果。以第一阶段制定的再生资源回收物流网络布局初始方案,置为当前解 F_x 和当前最好解 $F_x_bestSofar$,统计目标函数值 $AimF$ 和当前最好目标函数值 $AimF_bestSofar$,循环次数变量 $Mg = 0$ 、连续循环次数变量 $ConMg = 0$,并给出最大循环次数 Max_g 和最大连续循环次数 $ConMax_g$ 。

b) 调整与优化。以 F_x 为基础解,采用解改进优化策略获得当前网络规划方案,置为当前解 F_x' ,计算目标函数值 $AimF'$;

(a) 若 $AimF' < AimF_bestSofar$,置当前解 F_x' 为当前最好解 $F_x_bestSofar$,即 $F_x_bestSofar = F_x'$, $AimF_bestSofar = AimF'$; $Mg = Mg + 1$; $AimF = AimF'$, $F_x = F_x'$,转步骤 c)。

(b) 若 $AimF' < AimF$,置当前解 F_x' 为基础解,即 $F_x = F_x'$, $AimF = AimF'$, $Mg = Mg + 1$,转步骤 c)。

(c) 若 $AimF' = AimF$,以概率 0.5 接受当前解 F_x' 为基础解 F_x ($F_x = F_x'$, $AimF = AimF'$) 或基础解 F_x 不变, $Mg = Mg + 1$, $ConMg = ConMg + 1$,转步骤 c)。

(d) 若 $AimF' > AimF$,以概率 $\exp(AimF - AimF')$ 接受恶化解为当前解,即若概率 $\text{random}[0, 1] < \exp(AimF - AimF')$,则 $F_x = F_x'$, $AimF = AimF'$; 否则不接受当前恶化解。 $Mg = Mg + 1$,转步骤 b)。

c) 循环终止条件判断。若 $ConMg \leq ConMax_g$ 且 $Mg \leq Max_g$,转步骤 b);若 $Mg > Max_g$ 和 $ConMg > ConMax_g$ 满足其中之一,则调整优化过程结束,转步骤 d)。

d) 算法结束。以当前最好解 $F_x_bestSofar$ 为再生资源回收物流网络方案,输出各回收主体之间的运输量、回收中心和集散市场的建设和覆盖情况及总成本 $AimF_bestSofar$,算法结束。

对于第二阶段的调整优化算法中所采用的具体解改进优化策略可采取以下两种策略:

a) 备选决策。备选回收中心的综合处理能力越强,新建回收中心的固定成本越小,该备选回收中心被选中的机会越大;同理,备选集散市场的综合处理能力越强,新建集散市场的固定成本越小,该备选集散市场被选中的机会越多。综合处理能力是指综合考虑备选回收中心或集散市场对各品种物品的最大处理能力的综合评价,可分别按一定比例进行加权(w_i 表示第 t 种资源的权重)确定相应的综合处理能力。被选中的间隔几率按下式计算:

$$R_a = \left(\sum_{i=1}^{ngk} (w_i C_{ai} / F_a) \right) / \left(\sum_{a=1}^{n_{urc}} \sum_{i=1}^{ngk} (w_i C_{ai} / F_a) \right) \quad (14)$$

$$R_b' = \left(\sum_{i=1}^{ngk} (w_i C_{bi} / F_b) \right) / \left(\sum_{b=1}^{n_{um}} \sum_{i=1}^{ngk} (w_i C_{bi} / F_b) \right) \quad (15)$$

则各备选回收中心被选中的几率范围分别是 $[0, R_1)$ 、 $[R_1, R_1 + R_2)$, ..., $[\sum_{a=1}^{n_{urc}-1} R_a, 1)$,各备选集散市场被选中的几率范围

分别是 $[0, R_1')$ 、 $[R_1', R_1' + R_2')$, ..., $[\sum_{b=1}^{n_{um}-1} R_b', 1)$ 。随机产生相应个 $0 \sim 1$ 之间的随机数,分别代表备选回收中心(集散市场)的选择概率,若落入相应几率范围内(如代表备选回收中心 1 的随机数落入 $[0, R_1)$ 范围内),则 $z_i = 1$; 否则 $z_i = 0$ 。

b) 映射决策。按照各回收主体之间的映射关系 J -mapping,按一定比例随机对物品进行相互之间的匹配。

4 实例

某再生资源回收物流企业是地处中南的规模较大的一家国有再生资源回收物流企业,长期回收废纸、废钢铁等生活性再生资源。企业现拥有回收点 10 个、回收中心 3 个、集散市场 1 个、深加工中心 1 个。因业务扩展,需要对其回收网点布局重新规划,新建合适数目的回收中心与集散市场,以构建完善的再生资源回收物流网络体系。现企业已经初步拟定了 4 个回收中心备选地点和 3 个集散市场备选地点。企业再生资源回收物流过程中发生的主要成本费用、深加工中心、客户对两

种资源的需求量、废弃率如表 1~3 所示;新建一个回收中心固定成本为 10 万元,新建一个集散市场固定成本为 15 万元,其基础数据如表 4~11 所示(以“周”为一个周期进行计算)。

表 1 成本费用项目 /元/t

Table with 3 columns: 成本项目, 废纸, 废钢铁. Rows include 收购价格, 废弃物单位处理费用, 运至客户单位处理费用, etc.

表 2 深加工中心、客户的需求量(期望值)

Table with 3 columns: 需求项目/t, 废纸, 废钢铁. Rows include 深加工中心的需求量, 客户的需求量.

表 3 废弃率(期望值)

Table with 3 columns: 废弃率项目/%, 废纸, 废钢铁. Rows include 集散市场的直接废弃率, 运往深加工中心的比率, etc.

表 4 各回收点(P)废纸的日均回收量 /t

Table with 8 columns: 回收点, 周一, 周二, 周三, 周四, 周五, 周六, 周日. Rows include P1 to P10.

表 5 各回收点(P)废钢铁日均回收量 /t

Table with 8 columns: 回收点, 周一, 周二, 周三, 周四, 周五, 周六, 周日. Rows include P1 to P10.

表 6 回收点至回收中心单位运输费用(废纸) /元/t

Table with 8 columns: 回收点, RC1, RC2, RC3, SC1, SC2, SC3, SC4. Rows include P1 to P10.

表 7 回收点至回收中心单位运输费用(废钢铁) /元/t

Table with 8 columns: 回收点, RC1, RC2, RC3, SC1, SC2, SC3, SC4. Rows include P1 to P10.

表 8 回收点至集散市场单位运输费用(废纸) /元/t

Table with 5 columns: 回收点, M1, SM1, SM2, SM3. Rows include P1 to P10.

注:M 表示既有集散市场,SM 表示备选集散市场

表 9 回收点至集散市场单位运输费用(废钢铁) /元/t

Table with 5 columns: 回收点, M1, SM1, SM2, SM3. Rows include P1 to P10.

表 10 回收中心至集散市场单位运输费用(废纸) /元/t

Table with 5 columns: 回收中心, M1, SM1, SM2, SM3. Rows include RC1, RC2, RC3, SC1, SC2, SC3, SC4.

表 11 回收中心至集散市场单位运输费用(废钢铁) /元/t

Table with 5 columns: 回收中心, M1, SM1, SM2, SM3. Rows include RC1, RC2, RC3, SC1, SC2, SC3, SC4.

注:RC 表示既有回收中心,SC 表示备选回收中心

采用本文所提出的模型与算法,经计算机模拟仿真得出废纸、废钢铁的OD流及回收主体的覆盖情况,如图3所示。

经计算,该企业再生资源回收物流网络规划优化方案需要花费的成本为 958 293.94 元,原方案需花费成本为 1 210 415.7元,优化方案较原方案节约成本 252 121.76 元,优化程度达 20.83%,如表 12 和 13 所示。在优化的网络配置方案中,回收中心建设方案为备选回收中心 1、备选回收中心 3、备选回收中心 4;集散市场建设方案为备选集散市场 1 和备选集散市场 3。实例表明,所提出的模型与算法能够得到满意的再生资源回收物流网络布局优化方案。

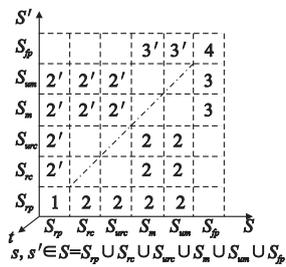


图2 三维参数矩阵

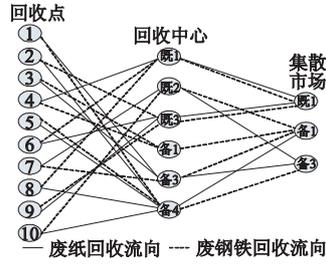


图3 OD流及回收主体的覆盖情况 (从回收点到集散市场)

表 12 原方案的成本费用项目表 /元

成本项目	废纸	废钢铁	总计
回收点的支付成本	53 500	286 800	340 300
F_1 回收点到回收中心的运输成本	787.60	1 528.80	2 316.4
回收点到集散市场的运输成本	0	0	0
F_2 回收中心的库存持有成本	374.50	717.00	1091.5
新建回收中心成本	400 000		400 000
F_3 回收中心至集散市场的运输成本	693.70	1 466.40	2 160.1
集散市场的库存持有成本	374.50	717.00	1 091.5
$F_4 + F_5$ 集散市场的内部处理费用	1 588.95	8 543.76	10 132.71
新建集散市场成本	450 000		450 000
$F_6 + F_7$ 集散市场到深加工处理中心处理费用	158.90	1 025.26	1 184.16
集散市场到客户的处理费用	502.10	447.70	949.8
F_8 废弃物处理成本	12.82	85.05	97.87
F_9 深加工中心缺货成本	0	547.44	547.44
深加工中心过量处理成本	19.79	0	19.79
F_{10} 客户缺货成本	315.80	0	315.8
客户过量处理成本	0	208.67	208.67
F 总成本	-	-	1 210 415.7

表 13 优化方案的成本费用项目表 /元

成本项目	废纸	废钢铁	总计
回收点的支付成本	53 500	286 800	340 300
F_1 回收点到回收中心的运输成本	578.40	924.00	1502.4
回收点到集散市场的运输成本	0	0	0
F_2 回收中心的库存持有成本	374.50	717.00	1 091.5
新建回收中心成本	300 000		300 000
F_3 回收中心至集散市场的运输成本	307.60	544.70	852.3
集散市场的库存持有成本	374.50	717.00	1 091.5
$F_4 + F_5$ 集散市场的内部处理费用	1 588.95	8 543.76	10 132.71
新建集散市场成本	300 000		300 000
$F_6 + F_7$ 集散市场到深加工处理中心处理费用	158.90	1 025.26	1 184.16
集散市场到客户的处理费用	502.10	447.70	949.8
F_8 废弃物处理成本	12.82	85.05	97.87
F_9 深加工中心缺货成本	0	547.44	547.44
深加工中心过量处理成本	19.79	0	19.79
F_{10} 客户缺货成本	315.80	0	315.8
客户过量处理成本	0	208.67	208.67
F 总成本	-	-	958 293.94

5 结束语

a)在界定再生资源回收物流概念的基础上,综合考虑再生资源回收物流作业流程、网络体系结构及其因素,将再生资源回收与需求视为随机因素,构建了再生资源回收物流网络规划优化模型,描述再生资源回收物流网络规划问题。

b)设计了两阶段启发式求解算法,提出了备选与映射决策两种解改进优化策略,其结果较原方案优化 20.83%,取得了较好的应用效果,能有效解决大规模再生资源回收物流网络规划问题。

c)再生资源回收物流网络优化模型与算法可推广用于单产品单周期、单品种多周期的再生资源回收物流网络优化问题,但对于多品种多周期的再生资源回收物流网络优化问题,应结合前后相邻周期连续性问题,所提出的模型与算法有待进一步改进,这也是笔者下一阶段的主要工作。

参考文献:

- [1] DOWLATSHAHI S. A cost-benefit analysis for the design and implementation of reverse logistics systems: case studies approach[J]. International Journal of Production Research, 2010, 48(5): 1361-1380.
- [2] SINHA S, SHANKAR R, TANEERANANON P. Modeling and case study of reverse logistics for construction aggregates[J]. International Journal of Logistics Systems and Management, 2010, 6(1): 39-59.
- [3] LISTES O, DEKKER R. A stochastic approach to a case study for product recovery network design[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 160(1): 268-287.
- [4] HU T L, SHEU J B, HUANG K H. A reverse logistics cost minimization model for the treatment of hazardous wastes[J]. Trans on Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2002, 38(6): 457-473.
- [5] JAYARAMAN V, PATTERSON R A, ROLLAND E. The design of reverse distribution networks: models and solution procedures[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 150(1): 128-149.
- [6] PISHVAEE S, KIANFAR K, KARIMI B. Reverse logistics network design using simulated annealing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 47(4): 269-281.
- [7] 狄卫民,王梅杰. 回收物流系统生产库存优化模型[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(7): 1539-1544.
- [8] 陈玲丽. 缺货的模糊需求回收物流库存控制模型及算法[J]. 系统管理学报, 2010, 19(1): 104-107.
- [9] 何波,杨超,张华,等. 固体废弃物逆向物流网络优化设计[J]. 系统工程, 2006, 24(8): 38-41.
- [10] 任鸣鸣,杨超. 废弃物联合回收物流网络优化设计[J]. 统计与决策, 2007, 14(2): 34-36.