

考虑碳排放量与数量折扣的闭环供应链网络 设计与多目标决策优化研究

顾秋阳^{1,2†}, 琚春华³, 吴功兴³

(1. 浙江工业大学 管理学院, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江工业大学 中国中小企业研究院, 浙江 杭州 310023;

3. 浙江工商大学 管理工程与电子商务学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 由于闭环供应链网络在环境法规、客户压力等方面都受到关注, 故供应商选择在供应链管理中更具挑战性, 本文所提闭环供应链网络模型可解决上述问题. 其中, 供应商会提供数量折扣以激励买家购买更多的产品. 模型的目标函数是将经济成本与碳排放量降至最低, 最大限度提升客户满意度等参数, 并确定出最佳的供应商、采购量、运输方式、技术类型、碳排放量、库存量及工厂间运输流量. 本研究基于MATLAB R2010a软件包对测试问题进行模型验证及敏感性分析, 结果表明: 考虑数量折扣后, 可显著降低供应链的总成本. 随着碳排放成本的上升, 供应链的总成本也会随之上升, 随之碳减排率也会不断提升. 可知该模型具有有效性与实用性, 可为供应链网络设计者提供决策依据, 为政府制定碳补贴政策实现减排提供理论依据.

关键词: 闭环供应链; 网络设计; 数量折扣; 碳排放量; 多目标优化

引用格式: 顾秋阳, 琚春华, 吴功兴. 考虑碳排放量与数量折扣的闭环供应链网络设计与多目标决策优化研究. 控制理论与应用, 2021, 38(3): 349 – 363

DOI: 10.7641/CTA.2020.00276

Research on the design and optimization of closed-loop supply chain network with consideration of carbon emission and quantity discount

GU Qiu-yang^{1,2†}, JU Chun-hua³, WU Gong-xing³

(1. School of Management, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310023, China;

2. China Institute for Small and Medium Enterprises, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310023, China;

3. School of Management Science & Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

Abstract: Since the closed-loop supply chain network attracts attention in environmental legislation, customer pressure and other aspects, supplier selection is more challenging in supply chain management. The closed-loop supply chain network model proposed in this paper could solve the above problem. In the model, suppliers will offer quantity discounts to encourage buyers to buy more products. The objective function of the model is to minimize the economic cost and carbon emissions, maximize customer satisfaction, and determine the best supplier, procurement, transportation method, technical type, carbon emissions, inventory, and transportation flow among factories. Based on the MATLAB R2010a software package, this study carries out model validation and sensitivity analysis. The results show that the total cost of the supply chain can be significantly reduced after considering the quantity discounts. With the increase of carbon emission cost, the total cost of the supply chain will also rise and, as a result, the carbon emission reduction rate will constantly increase. It can be seen that the model is effective and practical, which can provide basis of decision for supply chain network designers and provide theoretical basis of formulating carbon subsidy policies for the government to achieve emission reduction.

Key words: close-loop supply chain; network design; quantity discounts; carbon emission; multi-objective optimization

Citation: GU Qiuyang, JU Chunhua, WU Gongxing. Research on the design and optimization of closed-loop supply chain network with consideration of carbon emission and quantity discount. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(3): 349 – 363

收稿日期: 2020–05–13; 录用日期: 2020–10–04.

†通信作者. E-mail: guqiuyang123@163.com; Tel.: +86 17855812757.

本文责任编辑: 张化光.

国家自然科学基金项目(71173194, 71571162), 国家社科基金应急管理建设研究专项项目(20VYJ073), 浙江省哲学社会科学重大课题项目(20YSXK02ZD)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (71173194, 71571162), the National Social Science Fund Emergency Management System Construction Special Project (20VYJ073) and the Major Subject of Philosophy and Social Science in Zhejiang Province (20YSXK02ZD).

1 引言

当今世界,许多企业都企图完善业务流程以提升客户满意度,以期在越来越激烈的竞争环境中应对挑战.故供应链管理已成为学界与商界最感兴趣的问题之一^[1-2].而供应链网络设计是其中的关键性规划活动,也是供应链管理的基础结构问题,其对整体供应链效率的影响往往贯穿始终^[3-4].近年来,由于环境法规和意识的不断改善,也出于减少污染、缓解客户压力的目的,故如逆向物流、绿色制造与再制造、废物管理与重复使用等问题作为绿色供应链管理(green supply chain management)中的重要内容日益受到学界与商界的关注. Lin等^[5]将绿色闭环供应链网络设计(closed loop green supply chain network design)问题的解决方法分为以下3类:优化油耗、降低废气及二氧化碳排放、废旧物品管理等.李进等^[6]针对低碳环境下多级闭环供应链网络设计的战略定位和配置问题,考虑了供应链网络参数的模糊性及多产品流问题,以供应链网络的总成本和碳排放最小为目标,建立多目标鲁棒模糊优化模型.而对于导致环境问题的废气及碳排放, Lamba等^[7]探讨了低碳环境下的供应商选择问题,并将碳排放成本控制等作为供应商选择的标准之一进行建模. Benjaafar等^[8]分析了碳税、碳限额和碳交易对单寡头企业碳排放的影响, Guo等^[9]研究了我国碳税征收的条件和碳税的动态调整策略.张云丰等^[10]在单一供应商和单一零售商构成的两级供应链系统中,以价格折扣和交易信用作为协调机制,研究分散式供应链下各成员企业的利润状况和协调问题.通常供应商为促使买家大量订购,在其销售策略中往往会考虑数量折扣,而在多周期供应链问题中几乎没有学者考虑数量折扣要素对闭环绿色供应链网络设计与供应商选择问题进行研究的文献记录.

基于此,本文提出了一种考虑了碳排放量与数量折扣的多目标、多周期、多产品限量绿色闭环供应链网络多目标决策优化模型.该模型旨在降低成本与污染的同时最大限度的提高客户满意度.本文结构如下:第2节回顾了相关文献,第3节介绍了假设描述与符号说明,第4节介绍了模型构建,第5节给出了数值算例,第6节为结论及展望.

2 文献综述

本研究按正向物流、逆向物流、绿色闭环供应链网络和数量折扣4大类对文献进行梳理.关于正向物流, Zhang等^[11]提出了一种考虑需求和产品价格不确定性的多产品、多目标混合整数非线性规划(mixed integer nonlinear programming)模型.刘明等^[12]开发了用于突发事件环境下的供应链改进混合整数线性规划(mixed integer linear programming)模型以最大限度的降低服务成本及其对生命周期评估的影响. Zhang等^[13]设计了包括供应商、制造商与零售商的正向三

级绿色供应链网络,并运用博弈论确定了零售商的绿色产品加成本及销售价格.

由于逆向物流会影响政治、经济、法律与社会责任等方面,故而受到关注.张群等^[14]结合排队模型(queueing model)与逆向物流网络,开发了一种改进混合整数非线性规划模型以实现利润最大化,该模型采用遗传算法进行求解.张学龙等^[15]针对事前不确定性导致的退货问题,建立考虑定价差异和退货风险双重因素的市场需求函数,通过Stackelberg博弈模型研究四种不同市场需求情形在不同定价模式下双渠道供应链的最优决策. Ayvaz等^[16]提出了一种考虑退货数量、分拣率及运输成本不确定性的通用逆向物流网络两阶段随机规划模型,以最大限度的降低总成本并使利润最大化. Fleischmann等^[17]开发了一种正向/逆向综合物流模型.在逆向物流中设计了用于对产品进行检查和分析的拆卸部门与对产品进行再处理的处置部门,但其没有考虑新产品的生产与分销,为克服上述局限性,武志辉等^[18]在考虑店铺辅助服务降低顾客退货率的基础上,构建了微分博弈模型并研究供应链的店铺辅助策略和正向/逆向供应链的协调问题.

关于绿色闭环供应链网络,孙嘉轶等^[19]开发了一种双层可持续绿色供应链分销模型的高效解法,考虑了多目标模型中运输所导致的碳排放量,并根据道路及车辆类型解决路径问题. Zohal等^[20]提出了一种多目标混合整数线性规划模型,该模型包括经济与环境目标,并使用蚁群优化算法进行求解. Nurjanni等^[21]开发了单周期、单产品的混合整数线性规划模型以评估和优化闭环供应链网络中的绿色性能.邱若臻等^[22]设计一种改进混合整数线性规划模型以最大化闭环供应链网络的总利润,其特征为多产品、多阶段、考虑了需求及退货率的不确定等. Zeballos等^[23]提出了一种供应及需求均不确定条件下的多周期、多产品随机混合整数线性规划模型. Subulan等^[24]提出了一种多目标、多周期、多产品混合整数线性规划模型,除将总成本降至最低外,其在目标函数中还考虑通过开放设施最大限度地提高所收集电池的覆盖率,该模型用模糊目标规划模型求解. Talaei等^[25]建立了用于设备定位与分配网络设计的混合整数线性规划模型,该模型中的碳排放量由构建网络设备、生产过程及车辆运输产生. Govindan等^[26]开发了一种在不确定环境下的多周期混合整数线性规划模型,其目标为在最大限度地降低总成本的同时尽可能的提高供应商的绩效,并降低运输产生的碳排放量. Ozceylan等^[27]根据报废车辆的实际处理方法提出了一种多周期绿色闭环供应链网络. Safaei等^[28]为需求不确定条件下的废品回收网站建立了一种闭环供应链,以最大限度的提高期总利润,且在其所提混合整数线性规划模型中,利用鲁棒最优化方法对不确定性进行了处理.

Balaman等^[29]提出了一种包含两个混合整数线性规划模型的双层决策支持系统, 该系统适用于在不确定环境下的生产供应链及运输网络.

供应商选择中的主要问题是确定选择哪些供应商, 及从各供应商处采购商品数量^[30], 而数量折扣作为影响供应商选择的主要因素, 在闭环供应链网络设计问题中起重要作用, 但关于考虑数量折扣下的供应商选择的文献还较少. Meysam等^[31]设计了改进混合整数线性规划模型在不确定环境中整合闭环供应链网络和供应商选择, 其中每个供应商都可根据客户订单数量提供不同的价格折扣, 但其所提模型只针对于单时段、单目标问题, 且其假设不试用于本文. 基于数量折扣的供应商选择对于多周期问题有更高的效率, 且数量折扣对企业的多周期库存管理决策也会有较大影响^[25].

通过上述对现有研究成果的梳理发现, 关于多目标闭环供应链网络设计的研究已受到了国内外学者的重视并得到丰富的研究. 上述研究成果, 既对本研究具有一定的借鉴意义, 但也存在一些不足: 1) 首先, 已有很多学者对绿色低碳环境下的闭环供应链网络进行了建模分析, 但多数都只简单将碳排放量作为参数加入模型(如王珊珊等^[32]), 较少有将碳排放量与数量折扣在闭环供应链网络模型中进行融合文献记录; 2) 现有文献大多将模型转换为混合整数非线性规划模型进行实验(如李辉等^[33]), 这会使得模型求解的计算量变大, 本研究通过将订货量分成不相交等级使模型线性化, 减少了模型计算量, 提升了模型的实用性; 3) 现有的相关文献多只将经济成本最小化或碳排放量最小化作为模型目标(如Mohammadreza等^[34]), 很少同时将经济成本最小化、碳排放量最小化和客户满意度最大化作为模型目标函数的文献记录; 4) 现有关于闭环供应链网络的文献中的模型都只包括多层的正向流或逆向流(如Mohammad^[35]等), 但还未有学者在网络脆弱性度量与组合属性间建立联系, 以降低网络脆弱性的文献记录.

本研究基于以上综述, 认为应提出一种用于多周期、多产品、多目标环境中考虑了碳排放量与数量折扣的绿色闭环供应链网络决策优化模型. 该模型的正向流包括4层, 逆向流包括3层. 该模型的目标是将经济成本及环境污染降至最低, 并最大限度的提高客户满意度. 另外, 研究涵盖了混合处理中心、运输方式、技术类型选择、各中心的库存管理及碳排放量等要素. 供应商选择是现实供应链管理中的重要问题, 其不仅取决于商品的单价还取决于供应商根据采购量给出的折扣. 故本研究将绿色闭环供应链网络模型与基于数量折扣的供应商选择结合起来. 以期在现实生活中优化供应链网络环境、对有关部门进行碳减排提供依据; 同时也为提高消费者满意度提供参考.

3 假设描述与符号说明

3.1 假设与问题描述

本文讨论的绿色闭环供应链网络为多目标、多周期、多产品网络, 该网络包括供应商、产生/回收中心、配送中心、收集中心、处置中心、有确定需求的客户区等. 模型的正向流包括4层(即供应商、生产/回收中心、配送中心及客户), 其逆向流包括3层(即客户、收集/检查中心和处置中心). 在正向流中, 供应商负责根据各时期的订单向生产设备提供原材料, 并通过配送中心将产品从生产/回收中心运送至多个客户处以满足特定客户的需求. 在逆向流中, 将客户退回的产品收集并运送至收集中心以进行测试检验. 返回的产品经过质量检验后分为可回收类和废弃类. 将可回收产品运送至生产/回收中心, 废弃产品则运送至处置中心. 这种策略可以阻止不必要的退货运输, 退回的产品可直接转送至相应的设备中. 本文所提绿色闭环供应链网络的总体理论结构如图1所示.

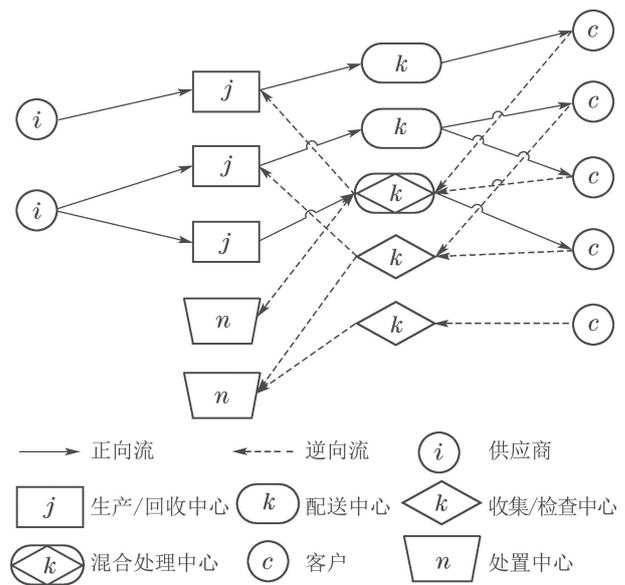


图 1 本文所提闭环绿色供应链网络的总体理论结构

Fig. 1 The overall theoretical structure of closed loop green supply chain network mentioned in this article

除经济目标外, 本文所提绿色闭环供应链网络设计与多目标决策优化问题还考虑了包括绿色采购、技术及运输方式等环境要素. 本文假定所提模型中的碳排放主要来自以下方面: 1) 供应商原材料(生产过程中所用原材料的碳排放由制造商负责); 2) 运输方式(运输方式、重量和速度都是排放水平的重要参数); 3) 技术(排放量与生产过程中所用的一系列技术成正比). 从全球视角来看, 约有14%的碳排放量与运输导致的碳排放有关^[36], 其重要决策之一是确定运输方式. 本文考虑用不同类型的卡车进行供应链节点间的正向及逆向产品运输, 在模型中采用不同类型的运输模式(如公路、铁路、飞机、船舶、陆上驳船、管道或联

运等). 供应链决策者可根据成本、质量、运输时间、速度、可达性及不同的环境等特征来选择运输方式.

本文所提模型包括3个目标函数. 第1个函数的目标是最大限度的降低供应链总成本, 这也是大多数闭环供应链网络设计问题的共同目标; 第2个函数的目标是通过降低运输及运营过程中的总碳排放水平来降低环境污染; 第3个函数的目标是通过采购绿色原料, 选择高质量、低碳排放且运输延迟最小的运输方式来提高客户满意度水平.

此外, 本文还探讨了现实供应链网络中基于供应商数量折扣的采购问题. 在该模型中, 供应商根据采购量给工厂不同的折扣水平. 订货量较多的买家则可拿到较低的采购价从而获得更多的潜在利润, 但也可能存在因平均库存较高而导致持有成本上升的风险, 故供应链决策者必须根据其实际贸易情况确定订货量. 故本文的主要创新之处在于, 在构建具有包含经济、环境及客户满意度目标的多周期、多产品、多目标绿色闭环供应链网络设计决策优化模型时将数量折扣纳入到采购过程中.

在设计本文所提绿色闭环供应链网络模型时, 除了上述设想外, 本研究还考虑了包括以下的特征与假设: 1) 本文所提绿色闭环供应链网络设计模型为多产品、多周期、多目标的模型; 2) 本模型中生产/回收中心、配送中心和收集中心的潜在定位是已知的; 3) 模型中的客户需求是确定的, 且每个周期内客户需求都应得到完全满足; 4) 模型中的生产/回收中心、配送中心及收集中心应考虑库存的持有成本; 5) 模型中供应商的订购数量所对应的折扣水平和最小订货量都是已知的; 6) 除了处置中心外, 模型中所有的部门都是有容量限制的; 7) 模型中的供应商提供两大类原材料: 绿色原材料和非绿色原材料; 8) 在模型中, 每个周期内, 仅可选择一名供应商; 9) 模型中的折扣数量适用于全部产品. 根据上述假设, 本文进行的决策是确定供应链网络中各部门的位置, 及各部门客户的分配情况. 并确定运输方式、各部门容量、自供应商处购买的原材料数量、生产/回收中心的生产数量和生产/回收中心、配送中心及检查/收集中心的产品库存水平以及供应链网络中各部门间的流量.

3.2 符号说明

在进行模型构建前, 本研究首先在此给出模型所用集合、参数和决策变量等符号的定义如下:

1) 集合: I 为供应商的集合, $i \in I$; J 为生产/回收中心的集合, $j \in J$; K 为配送、收集与混合处理中心的集合, $k \in K$; C 为客户的集合, $c \in C$; N 为处置中心的集合, $n \in N$; H 为技术类型的集合, $h \in H$; V 为运输方式的集合, $v \in V$; R 为原材料种类的集合, $r \in R$; P 为产品种类的集合, $p \in P$; T 为规划期间内的时

间周期的集合, $t \in T$.

2) 参数: flx_j 为开设生产/回收中心 j 的固定成本; fly_k 为开设配送中心 k 的固定成本; flw_k 为开设收集中心 k 的固定成本; flu_k 为开设混合处理中心和收集中心 k 的固定成本; pc_{jprht} 为生产/回收中心 j 在时间周期 t 内使用技术 h , 利用原材料 r 生产产品 p 的单位生产成本; $pc_{jpr'ht}$ 为生产/回收中心 j 在时间周期 t 内使用技术 h , 利用再生原材料 r' 生产产品 p 的单位生产成本; rc_{jpt} 为生产/回收中心 j 在时间周期 t 内回收产品 p 的单位回收成本; dc_{kpt} 为配送或混合处理中心 k 在时间周期 t 内对产品 p 的单位加工成本; cc_{kpt} 为收集或混合处理中心 k 在时间周期 t 内对产品 p 的单位收集/检验成本; dic_{npt} 为处置中心 n 在时间周期 t 内对产品 p 的单位处置成本; hrj_{jrt} 为生产/回收中心 j 在时间周期 t 内采购原材料 r 的单位存货持有成本; $hrrj_{jrt}$ 为生产/回收中心 j 在时间周期 t 内采购再生原材料 r 的单位存货持有成本; hpj_{jpt} 为生产/回收中心 j 在时间周期 t 内生产产品 p 后的单位存货持有成本; hpk_{kpt} 为配送或混合处理中心 k 在时间周期 t 内对产品 p 的单位存货持有成本; $hrpk_{kpt}$ 为收集或混合处理中心 k 在时间周期 t 内对可回收产品 p 的单位存货持有成本; $hnpk_{kpt}$ 为收集或混合处理中心 k 在时间周期 t 内对不可回收产品 p 的单位存货持有成本; tcf_{jkpvt} 为产品 p 在时间周期 t 内通过运输方式 v 自生产/回收中心 j 运送到配送或混合处理中心 k 的单位运输成本; tcf_{kcpvt} 为产品 p 在时间周期 t 内通过运输方式 v 自配送或混合处理中心 k 运送至客户 c 的单位运输成本; tcb_{ckpvt} 为已使用产品 p 在时间周期 t 内通过运输方式 v 自客户 c 运送至配送或混合处理中心 k 的单位运输成本; tcb_{kjpv} 为产品 p 在时间周期 t 内通过运输方式 v 自收集或混合处理中心 k 运输至生产/回收中心 j 的单位运输成本; tcb_{knpv} 为产品 p 在时间周期 t 内通过运输方式 v 自收集或混合处理中心 k 运输至处置中心 n 的单位运输成本; p_{irt} 为在时间周期 t 内从供应商 i 处采购原材料 r 的单位成本; dr_{irt} 为供应商 i 在时间周期 t 内对原材料 r 所提供的折扣率水平 l ; Q_{irt} 为在供应商 i 处在时间周期 t 内对原材料 r 在折扣率水平为 l 时的采购量; ec 为平均预期的碳排放成本; $pcec_{jprht}$ 为生产/回收中心 j 在使用技术 h 时, 在时间周期 t 内使用原材料 r 生产每单位产品 p 的预期碳排放量; $pcec_{jpr'ht}$ 为生产/回收中心 j 在使用技术 h 时, 在时间周期 t 内使用可回收原材料 r 生产每单位产品 p 的预期碳排放量; $rccec_{jpt}$ 为生产/回收中心 j 在时间周期 t 内回收一单位可回收产品 p 所产生的碳排放量; $cccec_{kpt}$ 为收集或混合处理中心 k 收集和检查一单位产品 p 所产生的碳排放量; $tcej_{jkpvt}$ 为产品 p 从生产/回收中心 j 在时间周期 t 内通过运输方式 v 运送至配送或混合处理中心 k 的碳排放量; $tcekc_{kcpvt}$ 为产品 p 从配送或混合处理中心 k 在

时间周期 t 内通过运输方式 v 运送至客户 c 处的碳排放量; $tceck_{ckpvt}$ 为产品 p 从客户 c 在时间周期 t 内通过运输方式 v 运送至收集或混合处理中心 k 处的碳排放量; $tcekj_{kjpvt}$ 为产品 p 从收集中心或混合处理中心 k 在时间周期 t 内通过运输方式 v 运送至生产/回收中心 j 处的碳排放量; $tcekn_{knpvt}$ 为产品 p 从收集中心或混合处理中心 k 在时间周期 t 内通过运输方式 v 运送至处置中心 n 处的碳排放量; 为在时间周期 t 内, 从供应商 i 处采购原材料 r 的客户满意度; $csfv_{jkvt}$ 为从生产/回收中心 j 在时间周期 t 内通过运输方式 v 运送至配送或混合处理中心 k 处的客户满意度; $csfv_{kcvvt}$ 为从配送或混合处理中心 k 在时间周期 t 内通过运输方式 v 运送客户 c 处的客户满意度; $csfv_{ckvt}$ 为从客户 c 在时间周期 t 内通过运输方式 v 运送至配送或混合处理中心 k 处的客户满意度; $csfv_{kjvt}$ 为从收集中心或混合处理中心 k 在时间周期 t 内通过运输方式 v 运送至生产/回收中心 j 处的客户满意度; $pcapr_{jpt}$ 为生产/回收中心 j 在时间周期 t 内对产品 p 的生产能力; $rcapr_{jpt}$ 为生产/回收中心 j 在时间周期 t 内对产品 p 的回收能力; hcj_{jrt} 为生产/回收中心 j 在时间周期 t 内对原材料 r 的最大持有能力; $hcj_{jr't}$ 为生产/回收中心 j 在时间周期 t 内对回收原材料 r' 的最大持有能力; hcj_{pjt} 为生产/回收中心 j 对成品 p 在时间周期 t 内的最大承载能力; $cadc_{kpt}$ 为配送中心 k 在时间周期 t 内对产品 p 的最大承载能力; $cacc_{kpt}$ 为收集中心 k 在时间周期 t 内对产品 p 的最大承载能力; $cahyb_{kpt}$ 为混合处理中心 k 在时间周期 t 内对产品 p 的最大承载能力; $cadic_{npt}$ 为处置中心 n 在时间周期 t 内对产品 p 的最大承载能力; mo_{it} 为供应商 i 在时间周期 t 内能承受的最小订购量; cas_{irt} 为供应商 i 在时间周期 t 内对原材料 r 的生产能力; TCe_t^{\max} 为在时间周期 t 内允许的最大碳排放量; M 为足够大的数; D_{cpt} 为客户 c 在时间周期 t 内对产品 p 的需求; δ_p 为客户对产品 p 的退货率; ρ_{rp} 为产品 p 中原材料 r 的利用率; $\rho_{r'p}$ 为回收原材料 r' 在产品 p 中的利用系数; rpr_p 为废旧产品 p 的再制造率; $\gamma_{pr'}$ 为回收后可循环使用的废旧产品 p 作为回收原料的转化系数;

3) 决策变量: PR_{jprht} 为生产/回收中心 j 使用技术 h , 在时间周期 t 内使用原材料 r 生产产品 p 的数量; $PR_{jpr'ht}$ 为生产/回收中心 j 使用技术 h , 在时间周期 t 内使用回收原材料 r' 生产产品 p 的数量; F_{jkpvt} 为在时间周期 t 内, 从生产/回收中心 j 通过运输方式 v 运输到配送中心或混合处理中心 k 的产品 p 的数量; F_{kcpvt} 为在时间周期 t 内, 从配送中心或混合处理中心 k 通过运输方式 v 向客户 c 发货的产品 p 的数量; BF_{ckpvt} 为在时间周期 t 内, 从客户 c 通过运输方式 v 运送到收集中心或混合处理中心 k 的产品 p 的数量; BF_{kjpvt} 为在时间周期 t 内, 从收集中心或混合处理中心 k 通过运输方式 v 运送到生产/回收中心 j 的可回收产品 p 的数量;

BF_{knpvt} 为在时间周期 t 内, 从收集中心或混合处理中心 k 通过运输方式 v 运送到处置中心 n 的不可回收产品 p 的数量; F_{ijrt} 为原材料 r 在时间周期 t 内从供应商 i 运至生产/回收中心 j 的数量; ILJ_{jt}^r 为在时间周期 t 结束时, 从生产/回收中心 j 处采购的原材料 r 的库存水平; $ILJ_{jt}^{r'}$ 为在时间周期 t 结束时, 从生产/回收中心 j 处回收原材料的库存水平; ILJ_{jt}^p 为在时间周期 t 结束时, 生产/回收中心 j 处成品 p 的库存水平; ILK_{kt}^p 为在时间周期 t 结束时, 配送中心或混合处理中心 k 处产品 p 的库存水平; IKK_{kt}^{rp} 为在时间周期 t 结束时, 收集中心或混合处理中心 k 处可回收产品 p 的库存水平; ILK_{kt}^{nrp} 为在时间周期 t 结束时, 收集中心或混合处理中心 k 处不可回收产品 p 的库存水平; X_j 为二值变量, 当在位置 j 处开设生产/回收中心则为“1”, 否则为“0”; Y_k 为二值变量, 当在位置 k 处开设配送中心则为“1”, 否则为“0”; W_k 为二值变量, 当在位置 k 处开设收集中心则为“1”, 否则为“0”; U_k 为二值变量, 当在位置 k 处开设混合处理中心则为“1”, 否则为“0”; TL_{jpht} 为二值变量, 当生产/回收中心 j 采用技术 h 生产产品 p 时则为“1”, 否则为“0”; SD_{irt} 为二值变量, 当供应商 i 在时间周期 t 内为原材料 r 提供折扣级别 i 为“1”, 否则为“0”; S_{irt} 为二值变量, 当供应商 i 在时间周期 t 内供应原材料 r 为“1”, 否则为“0”; B_{irt} 为二值变量, 在时间周期 t 内在供应商 i 处采购原材料 r 为“1”, 否则为“0”; Z_{jkvt} 为二值变量, 在时间周期 t 内通过运输方式 v 将货物自生产/回收中心 j 运至配送中心或混合处理中心 k 为“1”, 否则为“0”; Z_{kcvvt} 为二值变量, 在时间周期 t 内通过运输方式 v 将货物自配送中心或混合处理中心 k 运送到客户 c 处为“1”, 否则为“0”; Z_{ckvt} 为二值变量, 时间周期 t 内通过运输方式 v 将货物自客户 c 处运至收集中心或混合处理中心 k 为“1”, 否则为“0”; Z_{kjvt} 为二值变量, 在时间周期 t 内通过运输方式 v 将收集中心或混合处理中心 k 处运送到生产/回收中心 j 为“1”, 否则为“0”; AKC_{kct} 为二值变量, 配送中心或混合处理中心 k 能在时间周期 t 内满足客户 c 需求为“1”, 否则为“0”; ACK_{ckt} 为二值变量, 当收集中心或混合处理中心 k 在时间周期 t 内收集客户 c 使用过的产品为“1”, 否则为“0”。

4 模型构建

4.1 目标函数

本研究的第1个目标函数(见式(1))将总成本降至最低, 该函数包括构建各部门所用的固定成本、生产/回收中心的生产及回收成本、配送中心的产品运营成本、收集中心的退货产品收集/检查成本、处置中心的不可回收产品处置成本、生产/回收中心、配送中心及收集中心的库存保管成本及运营成本、从供应商处采购原材料的运输成本和采购成本(考虑了供应商

折扣数量相关的节约成本).

$$\begin{aligned} \min Z_1 = & \sum_j \text{flx}_j \times X_j + \sum_k \text{fly}_k \times Y_k + \\ & \sum_k \text{flw}_k \times W_k + \sum_k \text{flu}_k \times U_k + \\ & \sum_j \sum_p \sum_r \sum_h \sum_t \text{pc}_{jprht} \times \text{PR}_{jprht} + \\ & \sum_j \sum_p \sum_{r'} \sum_h \sum_t \text{pc}_{jpr'ht} \times \text{PR}_{jpr'ht} + \\ & \sum_k \sum_c \sum_p \sum_v \sum_t \text{rc}_{jpt} \times \text{BF}_{kjpt} + \\ & \sum_k \sum_c \sum_p \sum_v \sum_t \text{dc}_{kpt} \times F_{kcpvt} + \\ & \sum_c \sum_k \sum_p \sum_v \sum_t \text{cc}_{kpt} \times \text{BF}_{ckpvt} + \\ & \sum_k \sum_n \sum_p \sum_v \sum_t \text{dic}_{npt} \times \text{BF}_{knpt} + \\ & \sum_j \sum_r \sum_t \text{hrj}_{jrt} \times \text{ILJ}_{jt}^r + \\ & \sum_j \sum_{r'} \sum_t \text{hrrj}_{jr't} \times \text{ILJ}_{jt}^{r'} + \\ & \sum_j \sum_r \sum_t \text{hpj}_{jpt} \times \text{ILj}_{jt}^p + \\ & \sum_k \sum_p \sum_t \text{hpk}_{kpt} \times \text{ILK}_{kt}^p + \\ & \sum_k \sum_{p \in (rp)} \sum_t \text{hrpk}_{kpt} \times \text{ILK}_{kt}^{rp} + \\ & \sum_k \sum_{p \in (nrp)t} \sum_t \text{hnpk}_{kpt} \times \text{ILK}_{kt}^{nrp} + \\ & \sum_j \sum_k \sum_p \sum_v \sum_t \text{tcf}_{jkpvt} \times F_{jkpvt} + \\ & \sum_k \sum_c \sum_p \sum_v \sum_t \text{tcf}_{kcpvt} \times F_{kcpvt} + \\ & \sum_c \sum_k \sum_p \sum_v \sum_t \text{tcb}_{ckpvt} \times \text{BF}_{ckpvt} + \\ & \sum_k \sum_j \sum_p \sum_v \sum_t \text{tcb}_{kjpt} \times \text{BF}_{kjpt} + \\ & \sum_k \sum_n \sum_p \sum_v \sum_t \text{tcb}_{knpt} \times \text{BF}_{knpt} + \\ & \sum_i \sum_j \sum_r \sum_t p_{irt} \times F_{ijrt} + \\ & \sum_i \sum_l \sum_r \sum_t p_{irt} \times \text{dr}_{irlt} \times Q_{irlt} \times \text{SD}_{irlt}. \end{aligned} \tag{1}$$

本研究的第2个目标函数(见式(2))将目标视为碳排放量最小化. 其中, 生产/回收中心的生产/回收过程、收集中心的收集/检查过程及运输过程均涉及碳排放.

$$\begin{aligned} \min Z_2 = & ec(\sum_j \sum_p \sum_r \sum_h \sum_t \text{pcec}_{jprht} \times \text{PR}_{jprht} + \\ & \sum_j \sum_p \sum_{r'} \sum_h \sum_t \text{pcec}_{jpr'ht} \times \text{PR}_{jpr'ht} + \\ & \sum_k \sum_j \sum_p \sum_v \sum_t \text{rcec}_{jpt} \times \text{BF}_{kjpt} + \\ & \sum_c \sum_k \sum_p \sum_v \sum_t \text{cccec}_{kpt} \times \text{BF}_{ckpvt} + \\ & \sum_j \sum_k \sum_p \sum_v \sum_t \text{tcej}_{jkpvt} \times F_{jkpvt} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_k \sum_c \sum_p \sum_v \sum_t \text{tceck}_{kcpvt} \times F_{kcpvt} + \\ & \sum_c \sum_k \sum_p \sum_v \sum_t \text{tceck}_{ckpvt} \times \text{BF}_{ckpvt} + \\ & \sum_k \sum_j \sum_p \sum_v \sum_t \text{tekj}_{kjpt} \times \text{BF}_{kjpt} + \\ & \sum_k \sum_n \sum_p \sum_v \sum_t \text{tcekn}_{knpt} \times \text{BF}_{knpt}). \end{aligned} \tag{2}$$

本研究的第3个目标函数(见式(3))旨在最大限度的提高客户满意度. 该目标函数的主要目标是考虑供应链决策中的客户需求和市场趋势, 不同车型对客户订货交付时间和订单质量都有影响. 另外, 客户对车型的碳排放量与生产过程中的原材料类型也很敏感. 基于此目标, 应使客户在更短的时间内获得良好服务, 且保证碳排放量较低, 从而最大限度的提升客户满意度. 客户满意度无单位因子表示各车型与各原材料类型对客户的相对价值. 例如, 假定有3类卡车(1型、2型和3型)的客户满意度因子分别为0.6, 0.3和0.1. 故可知客户认为1型卡车的价值最大, 且客户均不愿意在供应链中使用3型卡车. 在供应链中, 客户对卡车的青睐程度分别为1型卡车>2型卡车>3型卡车.

$$\begin{aligned} \min Z_3 = & \sum_i \sum_r \sum_t \text{csfr}_{irt} \times B_{irt} + \\ & \sum_i \sum_k \sum_v \sum_t \text{csfv}_{jkvt} \times Z_{jkvt} + \\ & \sum_k \sum_c \sum_v \sum_t \text{csfv}_{kcv} \times Z_{kcv} + \\ & \sum_c \sum_k \sum_v \sum_t \text{csfv}_{ckvt} \times Z_{ckvt} + \\ & \sum_k \sum_j \sum_v \sum_t \text{csfv}_{kjvt} \times Z_{kjvt}. \end{aligned} \tag{3}$$

4.2 约束条件

4.2.1 库存与流量约束

为确保供应链网络部门间的流量平衡, 故本文结合文献[37], 设计库存和流量约束条件如下所示. 其中, 约束条件式(4)为确保从所有供应商进入各生产/回收中心的产品量及前期剩余库存产品之和等于现周期结束时的剩余库存及生产中所需原材料数量之和.

$$\begin{aligned} \text{ILJ}_{jt}^r = & \text{ILJ}_{j(t-1)}^r + \sum_j F_{ijrt} - \sum_p \sum_h \rho_{rp} \times \\ & \text{PR}_{jprht}, \forall j, r, t. \end{aligned} \tag{4}$$

约束条件式(5)–(6)分别确保了各类回收原材料和回收产品库存量的平衡.

$$\begin{aligned} \text{ILJ}_{jt}^{r'} = & \text{ILJ}_{j(t-1)}^{r'} + \sum_k \sum_p \sum_v \gamma_{pr'} \times \text{BF}_{kjpt} - \\ & \sum_p \sum_h \rho_{r'p} \times \text{PR}_{jpr'ht}, \forall j, r', t, \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \text{ILJ}_{jt}^p = & \text{ILJ}_{j(t-1)}^p + \sum_r \sum_h \text{PR}_{jprht} + \end{aligned}$$

$$\sum_{r'} \sum_h PR_{jpr'ht} - \sum_k \sum_v F_{jkpvt}, \forall j, p, t. \quad (6)$$

约束条件式(7)确保配送中心或混合处理中心各类产品库存量的平衡.

$$ILK_{kt}^p = ILK_{k(t-1)}^p + \sum_j \sum_v F_{jkpvt} - \sum_c \sum_v F_{ckpvt}, \forall k, p, t. \quad (7)$$

约束条件式(8)指出了配送中心或混合处理中心应满足的客户需求.

$$\sum_v F_{ckpvt} = D_{cpt} \times AKC_{kct}, \forall k, c, p, t. \quad (8)$$

约束条件式(9)表明对于各时期各产品, 由收集/检查中心在各客户处收集客户所用过产品的具体比率.

$$\sum_v BF_{ckpvt} = D_{cpt} \times \delta_{pt} \times ACK_{ckt}, \forall c, k, p, t. \quad (9)$$

约束条件式(10)–(11)分别将可回收和不可回收产品的库存约束表示为其他库存约束.

$$ILK_{kt}^{rp} = ILK_{k(t-1)}^{rp} + \sum_c \sum_v rpr_{pt} \times BF_{ckpvt} - \sum_j \sum_v BF_{kjpvt}, \forall k, p, t, \quad (10)$$

$$ILK_{kt}^{nrp} = ILK_{k(t-1)}^{nrp} + \sum_c \sum_v \sum_c \sum_v (1 - rpr_{pt}) \times BF_{ckpvt} - \sum_n \sum_v BF_{knpvt}, \forall k, p, t. \quad (11)$$

4.2.2 分配约束

分配约束决定了如何将客户区域分配给配送中心、收集中心或混合处理中心. 根据约束条件式(12), 仅有一个配送中心或混合处理设备满足各用户需求. 换言之, 每个客户区域都被分配至一个配送中心或混合处理中心上. 约束条件式(13)表示仅由一个收集中心或混合处理中心收集各客户使用过的废旧产品.

$$\sum_k AKC_{kct} = 1, \forall c, t, \quad (12)$$

$$\sum_k ACK_{ckt} = 1, \forall c, t. \quad (13)$$

4.2.3 容量约束

容量约束表示网络设备及其部件的容量. 约束条件(14)表示, 对于各时期的各类原材料, 从各供应商至所有生产/回收中心的出货量之和不超过相关供应商的产能.

$$\sum_j F_{ijrt} \leq cas_{irt} \times S_{irt}, \forall i, r, t. \quad (14)$$

约束条件式(15)–(16)表示生产/回收中心的生产及回收能力不超过其最大能力.

$$\sum_r PR_{jprht} + \sum_{r'} PR_{jpr'ht} \leq p\text{capr}_{jpt} \times TL_{jpht}, \forall j, p, h, t, \quad (15)$$

$$\sum_k \sum_v BF_{kjpvt} \leq r\text{capr}_{jpt} \times X_j, \forall j, p, t. \quad (16)$$

约束条件式(17)表示各时期周期内的各类原材料, 其库存水平不超过相关生产/回收中心的容量.

$$ILJ_{jt}^r \leq hcj_{jrt}, \forall j, r, t. \quad (17)$$

约束条件式(18)–(19)与约束条件式(17)类似, 二者均分别与各类回收原材料及产品相关, 而非与原材料相关.

$$ILJ_{jt}^{r'} \leq hcj_{jr't}, \forall j, r', t, \quad (18)$$

$$ILJ_{jt}^p \leq hcj_{jpt}, \forall j, p, t. \quad (19)$$

约束条件式(20)–(22)分别确保了配送、收集和处置能力均不超过相关部门中心的最大承载量.

$$\sum_j \sum_v F_{jkpvt} + ILK_{k(t-1)}^p \leq \text{cadc}_{jpt} \times Y_k + \text{cahyb}_{jpt} \times U_k, \forall k, p, t, \quad (20)$$

$$\sum_C \sum_v BF_{ckpvt} + ILK_{k(t-1)}^{rp} + ILK_{k(t-1)}^{nrp} \leq \text{cacc}_{jpt} \times W_k + \text{cahyb}_{jpt} \times U_k, \forall k, p, t, \quad (21)$$

$$\sum_k \sum_v BF_{knpvt} \leq \text{cadic}_{npt}, \forall n, p, t. \quad (22)$$

约束条件式(23)确保了在各时期内由同一潜在位置决定是否仅需要配送中心、收集和混合处理中心的其中之一.

$$Y_k + W_k + U_k \leq 1, \forall k. \quad (23)$$

4.2.4 技术约束

技术约束表示如何在各开放的生产/回收中心选择技术. 约束条件式(24)确保了如生产/回收中心未开放, 则不需要每次都通过相关技术生产各产品.

$$TL_{jpht} \leq X_j, \forall j, p, h, t. \quad (24)$$

约束条件式(25)规定了每次最多可选择一种技术来生产各类产品.

$$\sum_h TL_{jpht} \leq 1, \forall j, p, t. \quad (25)$$

约束条件(26)表示如果选用某种技术生产任一类型的产品, 则由下一时间周期内仍使用该技术进行生产.

$$TL_{jph(t-1)} \leq TL_{jpht}, \forall j, p, h, t. \quad (26)$$

4.2.5 运输约束

运输约束决定了供应链网络部门中心间运输产品所用的运输类型. 约束条件(27)–(30)规定了供应链网络部门间至多选用一种运输类型进行产品运输.

$$\sum_v Z_{jkvt} \leq 1, \forall j, k, t, \quad (27)$$

$$\sum_v Z_{kcv t} \leq 1, \forall k, c, t, \quad (28)$$

$$\sum_v Z_{ckvt} \leq 1, \forall c, k, t, \quad (29)$$

$$\sum_v Z_{kjvt} \leq 1, \forall k, j, t. \quad (30)$$

约束条件式(31)–(34)表示,如供应链网络部门中心间没有产生产品流,则相关设备间不选用任何运输类型.

$$Z_{kcv t} \leq \sum_p F_{kcpvt}, \forall k, c, v, t, \quad (31)$$

$$Z_{kcv t} \leq \sum_p F_{kcpvt}, \forall k, c, v, t, \quad (32)$$

$$Z_{ckv t} \leq \sum_p BF_{ckpvt}, \forall c, k, v, t, \quad (33)$$

$$Z_{kjt} \leq \sum_p BF_{kjpt}, \forall k, j, v, t. \quad (34)$$

约束条件式(35)–(38)确保了当选用某种运输类型来连接供应链中的相关部门中心时,则这些部门中心间存在产品流.

$$\sum_p F_{jkpit} \leq Z_{jkt} \times M, \forall j, k, v, t, \quad (35)$$

$$\sum_p F_{kcpvt} \leq Z_{kcv t} \times M, \forall k, c, v, t, \quad (36)$$

$$\sum_p BF_{ckpvt} \leq Z_{ckv t} \times M, \forall c, k, v, t, \quad (37)$$

$$\sum_p BF_{kjpt} \leq Z_{kjt} \times M, \forall k, j, v, t. \quad (38)$$

4.2.6 环境约束

以下约束条件表示了运输及运营有关的碳排放量限制.约束条件式(39)–(40)表示了各时期的供应链必须符合运输及运营相关的碳排放量限制.

$$\begin{aligned} & \sum_j \sum_k \sum_p \sum_v tcej_k F_{jkpvt} + \\ & \sum_k \sum_c \sum_p \sum_v tcek_c F_{kcpvt} + \\ & \sum_c \sum_k \sum_p \sum_v tceck_c BF_{ckpvt} + \\ & \sum_k \sum_j \sum_p \sum_v tcej_k BF_{kjpt} + \\ & \sum_k \sum_n \sum_p \sum_v tcekn_n BF_{knpvt} \leq \\ & TCe_t^{\max}, \forall t, \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} & \sum_k \sum_j \sum_p \sum_v rcec_{jpt} \times BF_{kjpt} + \\ & \sum_j \sum_p \sum_r \sum_h pcec_{jprht} \times PR_{jprht} + \\ & \sum_j \sum_p \sum_{r'} \sum_h pcec_{jpr'ht} \times PR_{jpr'ht} + \\ & \sum_c \sum_k \sum_p \sum_v ccek_{kpt} \times BF_{ckpvt} \leq \\ & OPCe_t^{\max}, \forall t. \end{aligned} \quad (40)$$

4.2.7 折扣及其他约束

首先考虑经济目标函数(式(1))最后两项,如式(41)所示:

$$\begin{aligned} & \sum_i \sum_j \sum_r \sum_t p_{irt} \times F_{ijrt} - \\ & \sum_i \sum_l \sum_r \sum_t p_{irt} \times dr_{irlt} \times Q_{irlt} \times SD_{irlt}, \end{aligned} \quad (41)$$

其中第1项表示原材料的采购成本.如采购量很大,则

可扣减数量折扣,此时要从原材料的初始成本中减去应计的数量折扣.如所有采购原材料都考虑了数量折扣,则应计数量折扣式如式(42)所示:

$$\begin{aligned} & \sum_i \sum_j \sum_r \sum_t p_{irt} \times F_{ijrt} - \\ & \sum_j \sum_i \sum_l \sum_r \sum_t p_{irt} \times dr_{irlt} \times F_{ijrt} \times SD_{irlt}, \end{aligned} \quad (42)$$

其中如上模型为混合整数非线性规划模型.为避免混合整数非线性规划模型的复杂性,本文设想以下两种情况:1)如采购量 Q 满足 $Q_i < Q < Q_{i+1}$,则参数 Q_i 表示采购拐点 i ,故仅考虑较低拐点 Q_i 的数量折扣.此法是根据数量折扣来计算 Q_i 个单位原材料的价格,根据初始价格计算 $Q - Q_i$ 个单位的原材料的价格.2)为降低忽略 $Q - Q_i$ 个单位的原材料的数量折扣所导致的误差,将区间 $[Q_i, Q_{i+1}]$ 分为 $|L|$ 个不相交等级,则每个新等级的数量折扣相较于其他等级的增加幅度为 ϵ (如图2所示).然后,对于每个新的不相交等级,将相关数量折扣约束添加至该问题中.增加新的不相交等级的数量可得到更为精确的解,该解近似等于包含式(42)在内的问题的解.

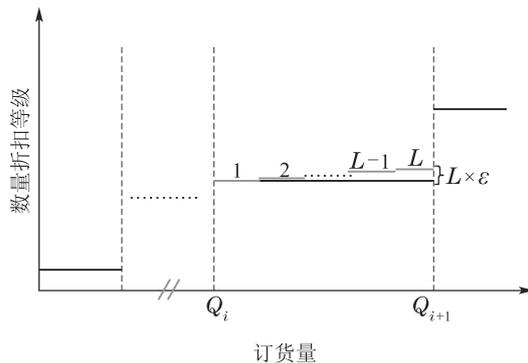


图2 将区间 $[Q_i, Q_{i+1}]$ 分为 $|L|$ 个不相交等级示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dividing interval $[Q_i, Q_{i+1}]$ into $|L|$ disjoint levels

通常在第1种情况下,无须将采购区间分为小区间即可求得该问题的解.在求解该问题并确定 Q 值后,将所确定的 Q 的相关区间分为小区间,从而得到的解近似于混合整数非线性规划模型的解.

如前所述,生产/回收中心从各供应商处采购所需原材料,每个供应商均会向买家告知具体的数量折扣政策.假定供应商的数量折扣政策有所差异且其互不相关,即每个供应商的数量折扣政策不会影响到其他供应商的决定.本文假定每个供应商可为原材料采购设置 N 个离散拐点或 $N + 1$ 个区间(即数量折扣等级),具体如图3所示.其中首个与最后一个区间的数量折扣等级分别为最小和最大,数量折扣等级与采购量对应.

为建立绿色闭环供应链网络设计问题中的数量折扣模型,本研究定义了一个二值变量 SD_{ilt} ,该变量表

示供应商*i*是否在时间周期*t*内提供了数量折扣等级*l*. 故该变量可表示为当所选代购区间的数量折扣变量为1时, 此时其余变量应为0. 即在每个时间周期内, 仅有一个针对采购量的数量折扣变量处于活动状态. 每个折扣拐点*n* ($n = 1, 2, \dots, N$) 有两个约束条件. 为用数学式表示上述数量折扣模型, 本研究提出了如式(43)约束条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_j F_{ijrt} - Q_{irlt} \leq M \times SD_{irlt} + \varepsilon, \\ \sum_j F_{ijrt} - Q_{irlt} \geq \\ M(SD_{irlt} - 1) + \frac{M}{L+1}(SD_{ir1t} + \dots + \\ SD_{ir(n-1)t}), \\ \sum_j F_{ijrt} - Q_{ir(l-1)t} \leq \\ M \times (SD_{ir(l-1)t} + SD_{irlt}) + \varepsilon, \forall i, r, t, \\ \sum_j F_{ijrt} - Q_{ir(l-1)t} \geq \\ M(SD_{ir(l-1)t} - 1) + \frac{M}{L+1}(SD_{ir1t} + \dots + \\ SD_{ir(n-2)t}), \\ \sum_j F_{ijrt} - Q_{ir(l-2)t} \leq \\ M \times (SD_{ir(l-2)t} + SD_{ir(l-1)t} + SD_{irlt}) + \varepsilon, \\ \sum_i F_{ijrt} - Q_{ir(l-2)t} \geq \\ M(SD_{ir(l-2)t-1}) + \frac{M}{L+1}(SD_{ir1t} + \dots + \\ SD_{ir(n-3)t}), \\ \vdots \\ \sum_j F_{ijrt} - Q_{ir2t} \leq \\ M \times (SD_{ir2t} + \dots + SD_{ir(l-1)t} + SD_{irlt}) + \varepsilon, \\ \sum_j F_{ijrt} - Q_{ir2t} \geq \\ M(SD_{ir2t-1}) + \frac{M}{L+1}(SD_{irlt}), \\ \sum_j F_{ijrt} - Q_{ir1t} \leq \\ M \times (SD_{ir1t} + SD_{ir2t} + \dots + SD_{irlt}) + \varepsilon, \\ \sum_j F_{ijrt} - Q_{ir1t} \geq M(SD_{ir1t} - 1). \end{array} \right. \quad (43)$$

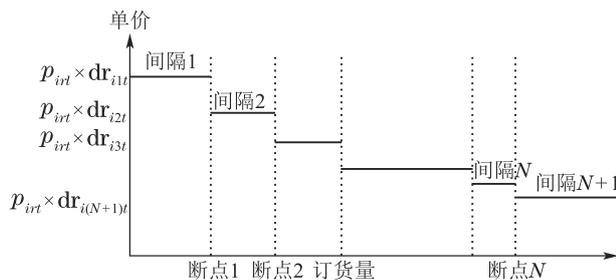


图 3 *N* 个拐点的订货量及单价的关系图

Fig. 3 Relationship diagram of order quantity and unit price at *N* inflexion points

值得注意的是, 尽管数量折扣等级被分为 $|N|$ 个不相交等级, 但随着折扣等级数量的增加, 这种离散形式将趋于连续. 故供应商可提供不同的数量折扣等级, 从而使得买家可灵活的采购原材料. 约束条件式(44)表示如每个时间周期内均未选择供应商*i*, 则不考虑该供应商的数量折扣等级.

$$\sum_r \sum_l SD_{irlt} \leq S_{irt}, \forall i, r, t. \quad (44)$$

约束条件式(45)表示每个时间周期内最多可选择一个供应商采购原材料.

$$\sum_i S_{irt} \leq 1, \forall r, t. \quad (45)$$

约束条件式(46)表示如果每个时间周期内均未选择供应商*i*, 则未从该供应商处采购原材料.

$$\sum_r B_{irt} \leq S_{irt} \times M, \forall i, r, t. \quad (46)$$

约束条件式(47)表示供应商*i*在时间周期*t*上所给出的所有原材料的最小订购量.

$$\sum_j \sum_r F_{ijrt} \geq mo_{it} \times S_{irt}, \forall i, r, t. \quad (47)$$

4.2.8 决策变量约束

以下约束表示该模型式所用的变量类型. 约束条件式(48)–(49)分别强化了对决策变量的非负性和二值限制.

$$\begin{array}{l} PR_{jprht}, PR_{jpr'ht}, F_{jkpvt}, F_{kcpvt}, BF_{ckpvt}, \\ BF_{kjpvt}, BF_{knpvt}, F_{ijrt}, ILJ_{jt}^r, ILJ_{jt}^{r'}, \\ ILJ_{jt}^p, ILK_{kt}^p, ILK_{kt}^{rp}, ILK_{kt}^{nrp} \geq \\ 0, \forall i, j, k, c, n, p, r, r', v, h, t, \end{array} \quad (48)$$

$$\begin{array}{l} X_j, Y_k, W_k, U_k, TL_{jpht}, SD_{irlt}, S_{it}, B_{irt}, \\ Z_{jkvt}, Z_{kcv}, Z_{ckvt}, Z_{kjvt}, AKC_{kc}, ACK_{ckt} \in \\ \{0, 1\}, \forall i, j, k, c, p, r, v, h, t. \end{array} \quad (49)$$

4.3 多目标函数

本文所提模型包含了冲突目标, 即一个目标获得较好的解会导致其他目标的解不佳, 故存在帕累托最优解. 现学界已开发了多种方法用于解决目标不一致的多目标问题, 如LP指标是适用于解决多目标问题的方法之一, 该法可最大限度的降低任一解与最优解间的差异. 为避免增加模型复杂性, 本研究将*p*值设为1, 当*p* > 1时目标函数为非线性模型, 故模型的复杂度会明显增加, 当*p* = 1时3个目标*Z*₁, *Z*₂和*Z*₃的LP指标如式(50)所示:

$$\begin{aligned} \min Z_4 = & w_1 \cdot \frac{Z_1 - Z_1^*}{Z_1^*} + w_2 \cdot \frac{Z_2 - Z_2^*}{Z_2^*} + \\ & w_3 \cdot \frac{Z_3 - Z_3^*}{Z_3^*}, \end{aligned} \quad (50)$$

其中: *Z*₁^{*}, *Z*₂^{*}, *Z*₃^{*}分别表示目标*Z*₁, *Z*₂和*Z*₃的理想解

(由TOPSIS法求得,具体计算方法参考Nurianni等^[21]的做法,且由于其只用于计算多目标决策函数的帕累托最优解,故理想解的具体数值与计算公式在此不再赘述), w_1, w_2 和 w_3 分别表示第1、第2和第3个目标的权重。

供应链决策者根据供应链政策决定目标函数的权重。即每个目标函数的权重表明了其优先级和重要性。故如果供应链的经济方面因素很重要,则第1个目标函数的权重较大,如果供应链政策更侧重于环境问题,则第2个目标函数的权重值较高。侧重于客户满意度和客户需求会使第3个目标函数的权重较高。本文用LP指标方法将多目标模型转换为单目标模型,从而求得所述模型的解。

表1 各测试问题中供应链网络各部门的数量

Table 1 Number of departments in the supply chain network in each test problem

测试问题	供应商数量(I)	潜在生产/回收中心数量(J)	潜在配送/收集中心数量(K)	客户区域数量(C)	处置中心数量(N)	原材料种类数量(R)	产品种类数量(P)	运输方式种类数量(V)	技术处种类数量(H)	时间周期数量(T)
1	2	2	3	4	1	2	3	3	3	4
2	3	3	6	6	1	3	3	3	3	4
3	5	5	10	10	5	6	4	5	4	6
4	7	7	15	15	5	6	4	5	4	6
5	10	10	20	25	10	8	5	7	5	10

表2 各测试问题中供应链网络各部门的数量

Table 2 Number of departments in the supply chain network in each test problem

参数名称	取值范围	参数名称	取值范围
flx_j	$\sim U(400000, 500000)$	$csfr_{irt}, csfv_{jkvt}, csfv_{kcv}$	$\sim U(0.5, 0.7)$
fly_k, flw_k, flu_k	$\sim U(150000, 200000)$	$csfv_{ckvt}, csfv_{kvt}$	$\sim U(0.5, 0.7)$
$pC_{jprht}, pC_{jpr'ht}$	$\sim U(80, 90)$	$pcapr_{jpt}$	$\sim U(10400, 19500)$
rc_{jpt}	$\sim U(8, 14)$	$rcapr_{jpt}$	$\sim U(10400, 17550)$
dc_{kpt}	$\sim U(4, 8)$	$hcj_{jrt}, hcj_{jr't}, hcj_{pjt}$	$\sim U(11000, 20000)$
cc_{kpt}	$\sim U(7, 12)$	$cadc_{kpt}, cadic_{npt}$	$\sim U(7800, 13000)$
dic_{npt}	$\sim U(3, 7)$	$cacc_{kpt}$	$\sim U(5200, 10400)$
$hrj_{jrt}, hrrj_{jr't}, hpj_{jpt}$	$\sim U(5, 8)$	$cahyb_{kpt}$	$\sim U(13000, 24000)$
$hpk_{kpt}, hrpk_{kpt}, hnpk_{kpt}$	$\sim U(5, 8)$	mo_{it}	$\sim U(500, 3000)$
$tcf_{jkpvt}, tcf_{kcpvt}, tcb_{ckpvt}$	$\sim U(2, 5)$	cas_{irt}	$\sim U(10000, 19000)$
tcb_{jkpvt}, tcb_{knpvt}	$\sim U(2, 5)$	$TCe_t^{max}, OPCe_t^{max}$	$\sim U(40000, 70000)$
p_{irt}	$\sim U(1, 10)$	D_{cpt}	$\sim U(2100, 4200)$
ec	$\sim U(0, 100)$	δ_p	$\sim U(0.4, 0.6)$
$pce_{jprht}, pce_{jpr'ht}$	$\sim U(1, 2)$	$\rho_{rp}, \rho_{r'p}$	$\sim U(2, 5)$
$rcec_{jpt}, rcec_{kpt}$	$\sim U(0.7, 1.5)$	rpr_p	$\sim U(0.65, 1)$
$tcej_{jkpvt}, tcek_{kcpvt}, tceck_{ckpvt}$	$\sim U(0.000175, 0.00075)$	$\gamma_{pr'}$	$\sim U(1, 2)$
$tcej_{kjpvt}, tcekn_{knpvt}$	$\sim U(0.000175, 0.00075)$		

为更详细直观的分析本文所提模型的运行效果,本研究使用MATLAB R2010a软件包,并设置参数数值如表2所示。计算机配置为Intel(R) Core(TM) i5 2.8 GHz, 16 G内存, 64 位Windows10操作系统。

5 数值算例

5.1 参数设置

为评估本文所述绿色闭环供应链网络模型的性能及适用性,本研究使用了文献[38–40]中选取的几个数值示例,其相关结果如第5.2小节所述。表1报告了各测试问题的特征,表2报告了其他测试问题的参数,参数均基于均匀分布随机生成。假定所有测试问题的折扣等级的数量为3,且每个供应商可向生产中心提供不同的折扣率。产品生产所用的各种技术遵循以下规则,即高级技术的成本较高但环境污染较小;供应链网络层间的运输可采用若干方式,且各自的特征是根据成本、服务时间质量和环境污染来确定的。

5.2 实验结果

表3报告了各测试问题的结果,其中第2列报告了各目标函数的权重。根据Balaman等^[29]的做法,求解各测试问题的3个权重结构如下所示: $W^1(w_1$

$= 0.6, w_2 = 0.2, w_3 = 0.2)$, $W^2(w_1 = 0.2, w_2 = 0.6, w_3 = 0.2)$, $W^3(w_1 = 0.2, w_2 = 0.2, w_3 = 0.6)$. 如前所述, 决策者可以根据目标的相对重要性生成不同的权重集. 这些结构的设置方式为, 每种结构侧重于其中一种目标函数的同时还要考虑所有目标函数. 在第3列中, 根据所设置的权重得出帕累托最优解集. 值得注意的是, 每个测试问题的各目标函数的最佳值均是通过其各自的最高权重得出的. 根据所设置的权重结构及所得解, 决策者可权衡目标函数选出合适的解. 最后一列表示各测试问题的计算时间及不同权重. 可知, 由于模型的复杂性(变量

多、约束条件多), 大型测试问题的计算时间要高于其他测试问题.

随后, 本研究检查了不同目标函数权重值的结果. 假定高质量、低排放率的车辆的环境排放量较少, 环境目标函数(Z_2)和客户满意度目标函数(Z_3)的工作方式相同, 因此, 为了有效显示目标函数的不一致行为, 将上述函数视为一个(Z'_2)进行分析. 在此条件下, LP指标可表示为如式(51)所示:

$$\min Z'_3 = w \cdot \frac{Z_1 - Z_1^*}{Z_1^*} + (1 - w) \cdot \frac{Z'_2 - Z_2^*}{Z_2^*}. \quad (51)$$

表3 各测试问题的结果

Table 3 Results of each test problem

测试问题	目标函数的权值			目标函数值(帕累托最优解)			计算时间/s
	w_1	w_2	w_3	Z_1	Z_2	Z_3	
1	0.6	0.2	0.2	7,014,052.60	763,482.53	52.80	0.98
	0.2	0.6	0.2	7,127,701.30	710,083.11	50.90	1.29
	0.2	0.2	0.6	7,173,358.00	759,210.36	54.00	0.78
2	0.6	0.2	0.2	34,894,378.32	2,624,910.10	105.9	39.67
	0.2	0.6	0.2	35,116,048.26	2,615,645.19	104.9	23.15
	0.2	0.2	0.6	35,026,334.30	2,626,891.45	108	79.45
3	0.6	0.2	0.2	107,945,236.49	14,425,346.37	257.35	2961.58
	0.2	0.6	0.2	108,508,805.73	14,348,073.34	265.15	3150.72
	0.2	0.2	0.6	109,521,122.67	14,540,088.65	275.5	3611.38
4	0.6	0.2	0.2	157,111,900.83	29,802,547.60	267.15	5480.75
	0.2	0.6	0.2	158,025,770.09	29,776,293.00	242.95	5637.99
	0.2	0.2	0.6	157,929,190.50	29,858,668.46	276.15	5982.31
5	0.6	0.2	0.2	503,412,853.00	85,803,286.78	593.00	21,126.44
	0.2	0.6	0.2	506,584,353.97	85,732,985.73	585.90	19,347.19
	0.2	0.2	0.6	504,203,407.51	86,034,765.84	610.15	23,842.83

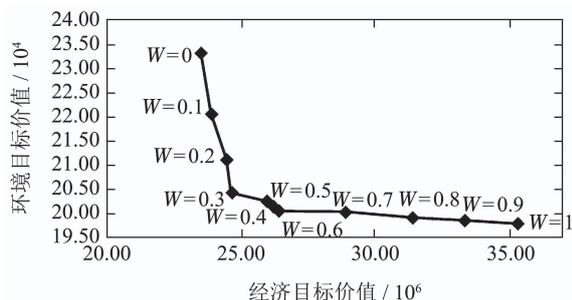


图4 经济目标函数与环境目标函数的权衡

Fig. 4 Trade-off between economic objective function and environmental objective function

在决策过程中, 同时考虑目标函数是非常重要的. 对于目标函数的不同行为, 本研究根据不同权重值得出了不同的帕累托最优解. 值得注意的是, 当 $w = 1, w = 0$ 时可获得第1个与第2个目标函数(即 Z_1, Z'_2)的最佳解. 图4中, 根据不同的权重值使

两个目标函数得以平衡, 并得出了帕累托最优解集. 决策者可根据自身偏好与政策从所得解中选出最佳解.

5.3 敏感性分析

然后本研究将根据变量与约束条件的数量来检验模型规模的复杂性. 表4报告了根据所述模型类型的变量及约束条件的分类. 时间段(T)与车型(V)的数量对变量和约束条件数量的增加影响最大. 同时, 模型的规模对配送中心、收集和混合处理中心(K)的可能定位及产品(P)极为敏感. 相较于其他特征, 供应商(I)及折扣等级(L)数量的增加不太会导致问题规模的增大.

图5报告了上述特征对测试问题2的CPU时间及变量、约束条件数量的影响. 不出所料, CPU时间随 T 的增加而大幅增加, 增大 V 和 K 可使CPU时间增幅变小, 但会导致变量和约束条件数量的显著增

加. 供应商相关的特征 I 和 L 对CPU时间的影响较小. 总之, 在本文所述模型中, 特征 T 与 P 对计算时

间影响极大. 此外, 增加可用选项类型相关的特征不会使CPU计算时间显著增加.

表4 本文所述模型的变量及约束条件的数量

Table 4 Variables and the number of constraints of the model described in this article

变量名称	表达式
二值变量	$J + 3K + JPHT + IRT(L + 2) + VT(JK + KC + CK + KJ) + 2KCT$
非负变量	$2JPRHT + PVT(JK + KC + CK + KJ + KN) + JT(IR + 2R + P) + 2KPT$
变量总数	$VT(JK(P + 1) + KC(P + 1) + CK(P + 1) + KJ(P + 1) + KNP)$
约束条件	$K + 2T(C + 1) + PT(4J + 3JH + 5K + N) + 2KT(J + C + CP + 2V(J + C)) + RT(2LI + 4I + 1 + 4J)$

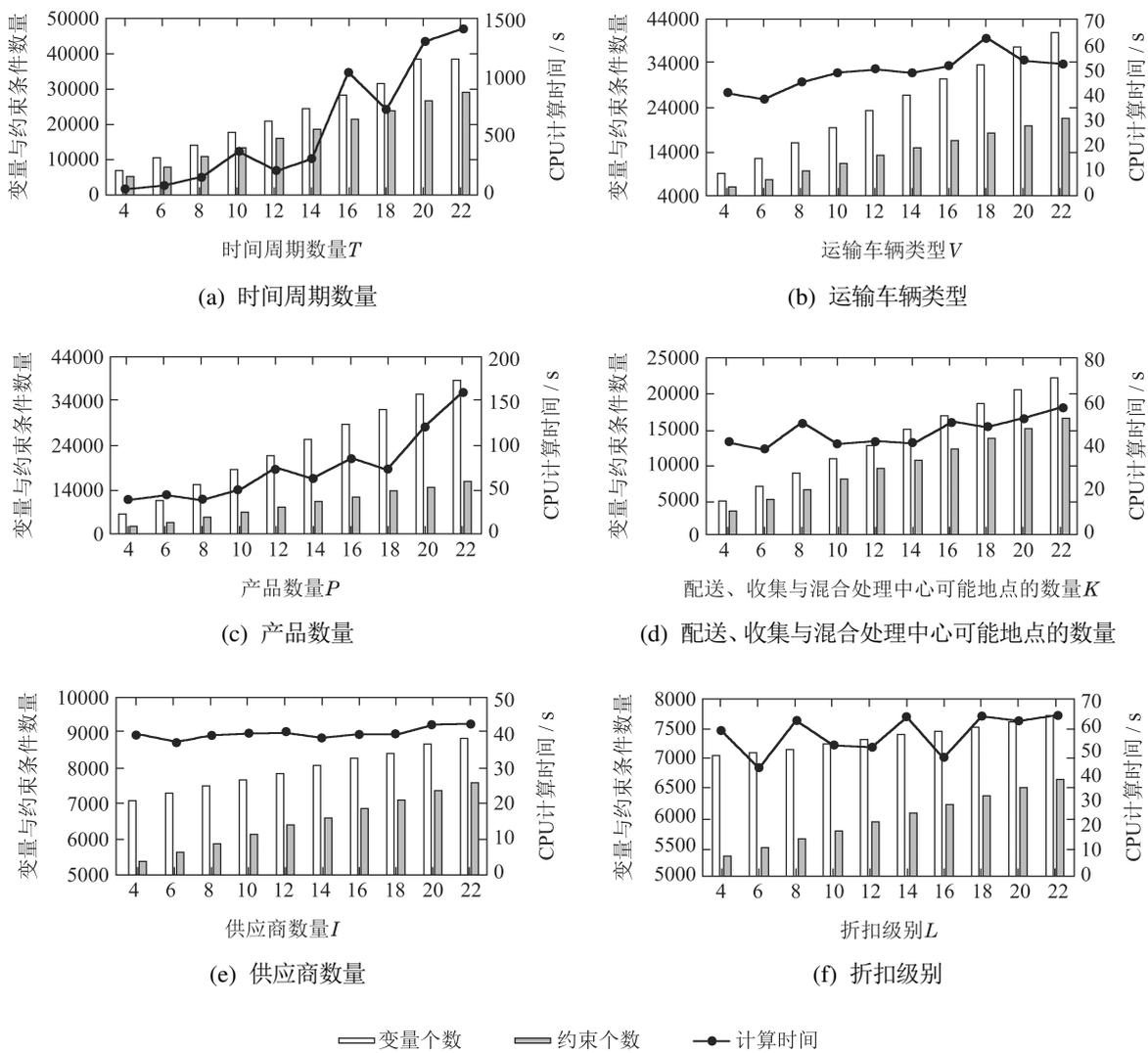


图5 不同参数变化对CPU计算时间及变量和约束条件数量的影响

Fig. 5 Influence of different parameter variations on CPU computing time and variables and number of constraints

为进一步验证本文所述模型的科学性, 本研究对碳排放成本及碳容许排放量的变化影响进行敏感性分析. 图6分别报告了碳排放价格对供应链总成本、经济和环境成本的影响. 可知随着碳排放成本

的上升, 供应链的总成本也会随之上升. 其中, 环境成本的增加要高于其他供应链成本. 而由于大部分总成本与经济成本有关, 故总成本增长较少.

可知, 随着碳排放成本的增加, 环境污染物的数

量减少了. 从图7中可看出, 随着碳排放成本的上升, 二氧化碳减排率不断提升. 本研究还进行了数量折扣的敏感性分析. 由于交付至客户的产品数量取决于其需求, 因此原材料的采购量不会影响逆向供应链网络的成本及客户区的交付产品. 故在采购决策分析中, 要根据相关限制考虑数量折扣对总成本、配送中心库存持有成本及原材料采购成本的影响.

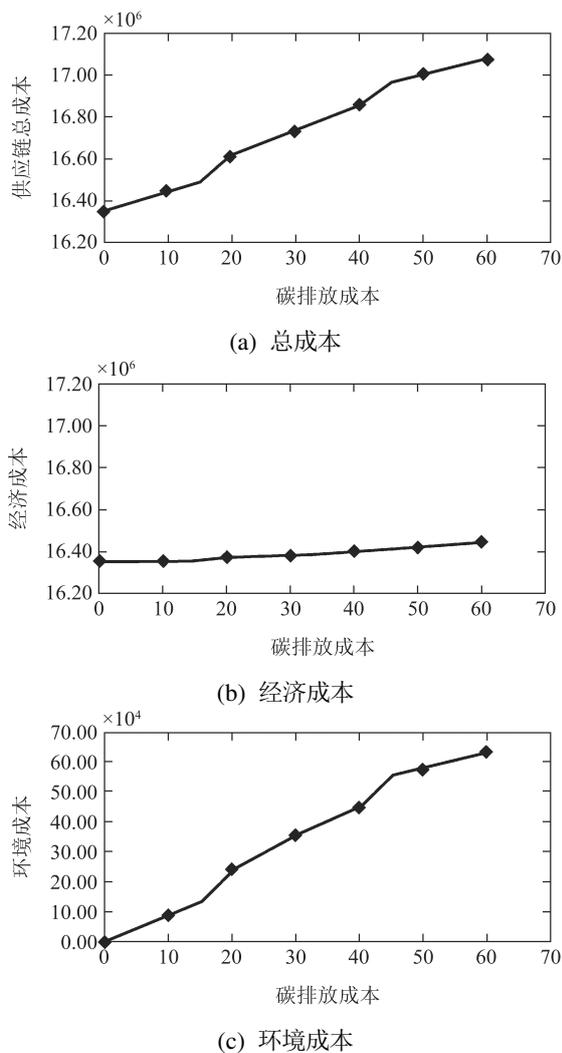


图6 碳排放成本变化对供应链总成本、经济成本和环境成本的影响

Fig. 6 Influence of carbon emission cost changes on total supply chain cost, economic cost and environmental cost

本文假定供应商为鼓励买家多买而提供了3个数量折扣范围. 其中采购量为8000, 10000, 12000以上的数量折扣分别为10%, 15%和18%. 图8报告了使用折扣后, 总成本、配送中心库存持有成本及原材料采购成本的变化百分比. 不出所料, 由于按折扣进行采购时, 原材料的采购成本下降; 另一方面, 由于成本数量的增加, 配送中心的库存持有成本上升了. 总供应链成本下降1.45%, 这表明采购成本下降的影响要大于库存持有成本增加的影响.

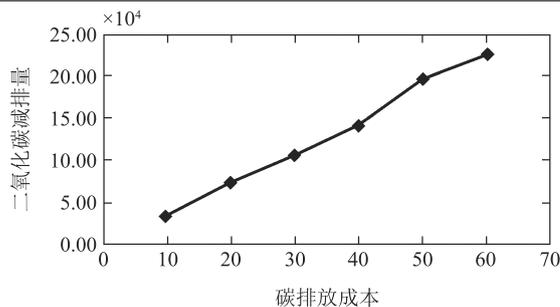


图7 碳排放成本上升对二氧化碳减排率的影响

Fig. 7 Influence of rising carbon emission cost on carbon dioxide emission reduction rate

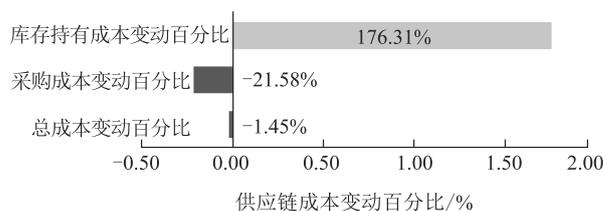


图8 考虑数量折扣后的供应链成本变动百分比

Fig. 8 Percentage changes of supply chain cost considering quantity discount

图9报告了使用与不使用数量折扣后供应链总成本在不同时间段的变化百分比. 当使用数量折扣时, 在前两个时间段内, 供应链成本攀升, 在接下来的两个时间段内, 总成本骤降. 该现象是由于在不同时间周期内有相当大一部分需求是在前两个时间周期中以较低价进行采购. 而由于采购量和库存成本的增加, 第1个时间周期的总成本有所增长, 这种增长在最后两个时间周期内被抵消. 而在不考虑数量折扣时, 虽然供应链成本也会随着时间周期的延长略有下降, 但下降幅度远不如考虑数量折扣的情况, 这说明数量折扣政策可在较长时间周期内有效降低供应链成本.

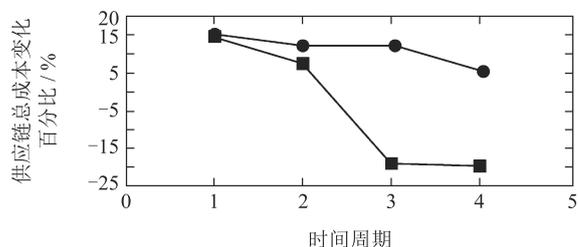


图9 不同时间周期内供应链总成本变动百分比

Fig. 9 Percentage changes of total supply chain cost in different time periods

另外, 考虑到供应商提供数量折扣会吸引下游生产商提升订货量, 由这些订货生产的产品顺着下游供应链会产生更多的碳足迹. 本研究对此进行了深入研究, 并借助前文所建模型与表2中设置的参

数值进行了相关实验, 结论表明当供应商使用数量折扣策略时, 确实会使下游生产商的订货量上升, 从而使得碳足迹延长, 本研究认为可考虑将引入Stackelberg博弈等理论模型, 将上述关系作为一个目标函数加入到模型中, 构建具有上下游多主体(供应商-生产商-销售商)间动态演化博弈特征的供应链多目标决策模型, 笔者将在未来的研究中尝试实现上述模型。

6 结论与展望

本研究提出了一种用于多周期、多产品、多目标环境中考虑了碳排放量与数量折扣的绿色闭环供应链网络决策优化模型。该模型的正向流包括4层(供应商、生产/回收中心、配送中心和客户区), 逆向流包括3层(收集/检查中心、处置中心、客户区)。该模型的目标是将经济成本及环境污染降至最低, 并最大限度的提高客户满意度。另外, 研究涵盖了混合处理中心、运输方式、技术类型选择、各中心的库存管理及碳排放量等要素。供应商选择是现实供应链管理中的重要问题, 其不仅取决于商品的单价还取决于供应商根据采购量给出的折扣。故本研究将绿色闭环供应链网络模型与基于数量折扣的供应商选择结合起来。为避免所述模型转换为混合整数非线性规划模型后的复杂性, 本研究通过将订货量分成不相交等级使模型线性化。为验证所述模型的科学性, 本研究使用MATLAB R2010a软件包进行数值求解。结果表明, 结合数量折扣因素后, 模型最优总成本更低, 且总成本变化可根据供应商的折扣政策、客户需求和库存成本有所区别。最后, 本文所述模型可使决策者在面对不同折扣决策时实现经济、环境目标的最佳解。

尽管本研究已提出了上述具有重要意义的发现, 但还是具有一些局限性, 其中一些可能会为未来的进一步研究指明方向。首先, 可针对某些所需计算时间较长的大型问题, 开发相对精确的计算方法。其次, 可考虑模型中某些参数的不确定性, 特别是需求与原材料单价。再次, 可尝试对供应商间的竞争及闭环供应链网络中各方使用博弈论或其他数学模型将其作为系统进行协调, 以实现利润最大化。最后, 可考虑在本文所提3个目标函数的基础上, 对其假设条件融合为单个目标函数, 以增加研究模型维度的可拓展性。

参考文献:

[1] LÜ Baolong, ZHANG Guitao, LIU Yang, et al. Nash game equilibrium model of the closed-loop supply chain network considering carbon tax mechanism and product green degree. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(1): 59 – 69.

- (吕宝龙, 张桂涛, 刘阳, 等. 考虑碳税和产品绿色度的闭环供应链网络Nash博弈均衡模型. 中国人口, 资源与环境, 2019, 29(1): 59 – 69.)
- [2] SUN Jiayi, TENG Chunxian, CHEN Zhaobo. Dynamic model of closed-loop supply chain network with product remanufacturing based on differential variational inequality. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2015, 35(5): 1155 – 1164.
(孙嘉轶, 滕春贤, 陈兆波. 基于微分变分不等式的再制造闭环供应链网络动态模型. 系统工程理论与实践, 2015, 35(5): 1155 – 1164.)
- [3] SRIVASTAVA S K. Network design for reverse logistics. *Omega*, 2008, 36(4): 535 – 548.
- [4] ZHANG Guitao, QU Xiaoyu, DAI Gengxing, et al. Multi-period closed-loop supply chain network equilibrium with design level for remanufactureability. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(8): 54 – 66.
(张桂涛, 曲箫宇, 戴更新, 等. 考虑再制造设计水平的多期闭环供应链网络均衡. 中国管理科学, 2018, 26(8): 54 – 66.)
- [5] LIN C, CHOY K L, HO G T S, et al. Survey of green vehicle routing problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(4): 1118 – 1138.
- [6] LI Jin. Multi-objective robust fuzzy optimization problem for closed-loop supply chain network design under low-carbon environment. *Control and Decision*, 2018, 33(2): 293 – 300.
(李进. 低碳环境下闭环供应链网络设计多目标鲁棒模糊优化问题. 控制与决策, 2018, 33(2): 293 – 300.)
- [7] LAMBA K, PRAKASH S S, MISHRA N. Integrated decisions for supplier selection and lot-sizing considering different carbon emission regulations in big data environment. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 128(2): 1052 – 1062.
- [8] BENJAAFAR S, LI Y, DASKIN M. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models. *IEEE Transactions on Automation Science & Engineering*, 2013, 10(1): 99 – 116.
- [9] GUO X L, CHENG L H, LIU J. Green supply chain contracts with eco-labels issued by the sales platform: Profitability and environmental implications. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(5): 1485 – 1504.
- [10] ZHANG Yunfeng, WANG Yong, GONG Bengang, et al. Coordination for ameliorating items supply chain based on price discount and trade credit. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(8): 1721 – 1730.
(张云丰, 王勇, 龚本刚, 等. 考虑价格折扣与交易信用的改良品供应链协调. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1721 – 1730.)
- [11] ZHANG G T, ZHONG Y G, SUN H, et al. Multi-period closed-loop supply chain network equilibrium with carbon emission constraints. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 104: 354 – 365.
- [12] LIU Ming, LI Yingzhu, Cao Jie, et al. An optimal design of emergency logistics network for epidemic controlling based on service level. *Chinese Journal of Management Science*, 2020, 28(3): 11 – 20.
(刘明, 李颖祖, 曹杰, 等. 突发疫情环境下基于服务水平的应急物流网络优化设计. 中国管理科学, 2020, 28(3): 11 – 20.)
- [13] ZHANG C T, LIU L P. Research on coordination mechanism in three-level green supply chain under non-cooperative game. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(5): 3369 – 3379.
- [14] ZHANG Qun, LI Rong. Advances in reverse logistics network design research. *Chinese Journal of Management Science*, 2016, 24(9): 165 – 176.
(张群, 李蓉. 逆向物流网络设计研究进展. 中国管理科学, 2016, 24(9): 165 – 176.)
- [15] ZHANG Xuelong, WU Doudou, WANG Junjin, et al. Research on the pricing decision of manufacturer dual-channel supply chain considering return risk. *Chinese Journal of Management Science*, 2018,

- 26(3): 59 – 70.
(张学龙, 吴豆豆, 王军进, 等. 考虑退货风险的制造商双渠道供应链定价决策研究. 中国管理科学, 2018, 26(3): 59 – 70.)
- [16] AYVAZ B, BOLAT B, AYDIN N. Stochastic reverse logistics network design for waste of electrical and electronic equipment. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 104(7): 391 – 404.
- [17] FLEISCHMANN M, BEULLENS P, BLOEMHOF-RUWAARD J M, et al. The impact of product recovery on logistics network design. *Production and Operations Management*, 2001, 10(2): 156 – 173.
- [18] WU Zhihui, CHEN Donghui. Coordinating a supply chain with consumer returns in dynamic setting. *Control and Decision*, 2020, 35(1): 250 – 256.
(武志辉, 陈东彦. 动态背景下考虑顾客退货影响的供应链协调问题. 控制与决策, 2020, 35(1): 250 – 256.)
- [19] SUN Jiaye, TENG Chunxian, CHEN Zhaobo. Multi-period Closed-loop supply chain network equilibrium model with product remanufacturing. *Operations Research and Management Science*, 2014, 23(4): 25 – 32.
(孙嘉轶, 滕春贤, 陈兆波. 基于再制造的多周期闭环供应链网络均衡模型. 运筹与管理, 2014, 23(4): 25 – 32.)
- [20] ZOHAL M, SOLEIMANI H. Developing an ant colony approach for green closed-loop supply chain network design: A case study in gold industry. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 133(5): 314 – 337.
- [21] NURJANNI K P, CARVALHO M S, COSTA L. Green supply chain design: A mathematical modeling approach based on a multi-objective optimization model. *International Journal of Production Economics*, 2017, 183(8): 421 – 432.
- [22] QIU Ruozhen, XIAO Xin, SUN Yimeng, et al. Robust multi-product multi-period supply chain network design model under uncertainty. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(10): 2655 – 2665.
(邱若臻, 肖欣, 孙艺萌, 等. 不确定环境下的鲁棒多产品、多周期供应链网络设计模型. 计算机集成制造系统, 2019, 25(10): 2655 – 2665.)
- [23] ZEBALLOS L J, MENDEZ C A, BARBOSA-POVOA A P, et al. Multi-period design and planning of closed-loop supply chains with uncertain supply and demand. *Computers & Chemical Engineering*, 2014, 66(2): 151 – 164.
- [24] SUBULAN K, TASAN A S, BAYKASOGLU A. A fuzzy goal programming model to strategic planning problem of a lead/acid battery closed-loop supply chain. *Journal of Manufacturing Systems*, 2015, 37(9): 243 – 264.
- [25] TALAEI M, MOGHADDAM B F, PISHVAEE M S, et al. A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: A numerical illustration in electronics industry. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 113(10): 662 – 673.
- [26] GOVINDAN K, DARBARI J D, AGARWAL V, et al. Fuzzy multi-objective approach for optimal selection of suppliers and transportation decisions in an eco-efficient closed loop supply chain network. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165(6): 1598 – 1619.
- [27] OZCEYLAN E, DEMIREL N, CETINKAYA C, et al. A closed-loop supply chain network design for automotive industry in Turkey. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 113(12): 727 – 745.
- [28] SAFAEI A S, ROOZBEH A, PAYDAR M M. A robust optimization model for the design of a cardboard closed-loop supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 166(8): 1154 – 1168.
- [29] BALAMAN, SEBNEM Y, MATOPOULOS A, et al. Integrated optimization of sustainable supply chains and transportation networks for multi technology bio-based production: A decision support system based on fuzzy ϵ -constraint method. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172(11): 2594 – 2617.
- [30] CAO Xiaogang, ZHENG Benrong, WU Jinfeng, et al. Equilibrium analysis of closed-loop supply chain based on the stochastic demand and risk decision-making. *Operations Research and Management Science*, 2014, 23(2): 89 – 98.
(曹晓刚, 郑本荣, 吴锦峰, 等. 随机需求下考虑风险行为的闭环供应链网络均衡模型. 运筹与管理, 2014, 23(2): 89 – 98.)
- [31] MEYSAM S K, MAGHSUD S, ALI D. An integrated supply chain configuration model and procurement management under uncertainty: A set-based robust optimization methodology. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(17): 7928 – 7947.
- [32] WANG Shanshan, ZHANG Lihao, FAN Tijing. Equilibrium strategies of carbon reduction technology adoption in competitive supply chains. *Chinese Journal of Management Science*, 2020, 28(6): 73 – 82.
(王珊珊, 张李浩, 范体军. 基于碳减排技术的竞争供应链投资均衡策略研究. 中国管理科学, 2020, 28(6): 73 – 82.)
- [33] LI Hui, WANG Chuanxu, XU Lang. Decisions of carbon emission reduction and low-carbon promotion in closed-loop supply chain under different competitive structures. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(10): 1776 – 1790.
(李辉, 汪传旭, 徐朗. 不同竞争结构下闭环供应链碳减排和低碳推广决策. 控制理论与应用, 2019, 36(10): 1776 – 1790.)
- [34] MOHAMMADREZA H M, MINA N. Coordination of green quality and green warranty decisions in a two-echelon competitive supply chain with substitutable products. *Journal of cleaner production*, 2018, 172(6): 2876 – 2891.
- [35] MOHAMMAD B F, FARIBA G. A fuzzy multi-objective programming approach to develop a green closed-loop supply chain network design problem under uncertainty: Modifications of imperialist competitive algorithm. *RAIRO—Operations Research*, 2019, 53(3): 963 – 990.
- [36] ZHANG Yunfeng, WANG Yong, GONG Bengang, et al. The level coordination for the ameliorating items supply chain considering ordering coordination cost and quantity discount. *Chinese Journal of Management Science*, 2019, 27(12): 55 – 66.
(张云丰, 王勇, 龚本刚, 等. 考虑订货协调成本与数量折扣的改良品供应链水平协调. 中国管理科学, 2019, 27(12): 55 – 66.)
- [37] LI Jin, ZHU Daoli. Multi-objective programming model and algorithm for low-carbon closed-loop supply chain network design under fuzzy environment. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(2): 494 – 504.
(李进, 朱道立. 模糊环境下低碳闭环供应链网络设计多目标规划模型与算法. 计算机集成制造系统, 2018, 24(2): 494 – 504.)
- [38] AFSHIN G, MOHAMMAD M P, ABODUL S S. A faucet closed-loop supply chain network design considering used faucet exchange plan. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 235(6): 503 – 518.
- [39] JING Yi, LI Wenchuan, ZHOU Yi. Recycling-production-distribution collaborative planning for closed-loop supply chain under uncertain environment. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(8): 2098 – 2110.
(景熠, 李文川, 周旖. 不确定环境下闭环供应链的回收-生产-分销协同计划. 计算机集成制造系统, 2018, 24(8): 2098 – 2110.)
- [40] GOVINDAN K, DARBARI J D, AGARWAL V, et al. Fuzzy multi-objective approach for optimal selection of suppliers and transportation decisions in an eco-efficient closed loop supply chain network. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165(6): 1598 – 1619.

作者简介:

顾秋阳 博士研究生, 目前研究方向为舆情传播控制、中小企业智能信息处理与高质量发展、商务智能大数据挖掘, E-mail: guqiuyang123@163.com;

琚春华 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能信息处理、商务智能大数据挖掘, E-mail: juchunhua@hotmail.com;

吴功兴 博士研究生, 目前研究方向为信息系统控制、商务智能大数据挖掘, E-mail: ywngx@zjgsu.edu.cn.