

# 可持续逆向物流网络设计研究进展及趋势

甘俊伟<sup>1,2</sup>, 罗利<sup>†</sup>, 寇然<sup>1</sup>

(1. 四川大学 商学院, 成都 610065; 2. 四川旅游学院 经济管理学院, 成都 610100)

**摘要:** 随着可持续发展理念的深入践行以及逆向物流活动对环境与社会影响的日益显著, 可持续逆向物流网络设计问题正成为研究的热点. 首先系统总结了可持续逆向物流网络研究的总体现状, 并对经济、环境、社会目标测度指标与方法、数学模型的决策变量、目标函数与约束条件、不确定因素考虑及处理方法、问题求解方法与工具以及研究应用情况进行概述. 研究发现, 经济、环境与社会影响测度指标不完善, 尤其是环境与社会影响类决策变量考虑较少, 社会可持续研究总体偏少且测度方法有待突破. 同时, 较少考虑多周期、多产品、越库作业、按质量等级回收、不确定环境等真实逆向物流运作场景, 战略、战术与运作层面集成优化不够, 以上这些均限制了模型的应用. 面对复杂的数学模型, 较少采用区间优化、模拟仿真等方法求解不确定问题, 更为高效、可靠的元启发式算法或精确算法亟待设计, 同时应用仿真优化技术、交叉熵等进行效能评估或算法间比较以提升网络设计的效率和科学性. 最后展望了可持续逆向物流网络设计潜在的发展趋势.

**关键词:** 逆向物流; 网络设计; 可持续; 优化模型; 废弃物管理; 研究进展

中图分类号: F273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1175

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 甘俊伟, 罗利, 寇然. 可持续逆向物流网络设计研究进展及趋势[J]. 控制与决策, 2020, 35(11): 2561-2577.

## Progress and prospects of sustainable reverse logistics network design

GAN Jun-wei<sup>1,2</sup>, LUO Li<sup>†</sup>, KOU Ran<sup>1</sup>

(1. Business School, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. School of Economics and Management, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China)

**Abstract:** With the deepening practice of the concept of sustainable development and the increasingly significant impact of the environment and society of reverse logistics activities, the design of sustainable reverse logistics network is becoming a research hotspot. Firstly, this paper systematically summarizes the general situation of sustainable reverse logistics network design research. Then the paper overviews the progress from five aspects, including the indicators and methods for measuring economic, environmental and social sustainability, the decision variables, objective functions and constraints of mathematical models, the uncertainties considered and the treatment techniques, the methods and tools of model solving and research application. It is found that the indicators of economic, environmental and social impact measurement need to be expanded, especially the decision-making variables of environmental and social impact are less considered, the overall research of social sustainability is less and the measurement method needs to be broken through. At the same time, the real reverse logistics operation scenarios such as multi-period, multi product, cross docking, collecting according to quality level and uncertain environment, are not considered enough, and the integration and optimization of strategies, tactics and operation levels are not enough. All of above restrict the application of the model. In the face of complex mathematical models, interval optimization and simulation are seldom used to solve uncertain problems, furthermore, more efficient and reliable meta heuristic algorithms or precise algorithms need to be designed urgently. Moreover, simulation optimization technology and cross entropy are used for efficiency evaluation or algorithm to algorithm ratio to improve the efficiency and scientificity of network design. Finally, the prospects of sustainable reverse logistics network design are presented.

**Keywords:** reverse logistics; network design; sustainability; optimization model; waste management; research progress

收稿日期: 2019-08-17; 修回日期: 2020-02-26.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(71872118, 71532007); 四川省社会科学重点研究基地四川循环经济中心一般项目(XHJJ-1615); 四川省社会科学重点研究基地系统科学与企业发展研究中心一般项目(Xq16C08); 四川省社会科学重点研究基地四川省农村发展研究中心青年项目(CR1516); 成都市社科规划项目(2018Z30); 成都市软科学项目(2019-RK00-00272-ZF).

**责任编辑:** 刘士新.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: luolicc@scu.edu.cn.

## 0 引言

20世纪90年代以来,随着环境资源压力的加大、政府法规力度的增强、产品生命周期的缩短、消费者环保意识的提升以及商业竞争的加剧,逆向物流活动逐渐受到社会关注.特别是,逆向物流活动因其在降低企业经营成本、塑造绿色企业形象、改善客户关系以及提升服务水平等方面的诸多优势,也正成为越来越多企业共同的战略选择,且被置于优先发展的地位<sup>[1-3]</sup>,如Apple、UPS、H&M、华为、Dasani、Dell、GM、HP、Kodak、Xerox等.逆向物流不同于正向物流,涉及各类废旧产品的再利用、再循环、再制造、废品处置等作业活动以及伴随产生的收集、储存、运输等物流活动<sup>[4]</sup>,具有高度复杂性、多环节性、供需失衡性以及不确定性等特征.这些特征使逆向物流系统运作更依赖于物流网络支撑<sup>[5]</sup>.逆向物流网络设计属于战略层决策,对整个系统运作影响深远,被普遍认为是逆向物流管理中首要且最重要的任务<sup>[6-8]</sup>.

值得注意的是,逆向物流网络设计不仅需要关注经济因素,环境与社会影响亦是必须考虑的重要内容.逆向物流运作产生的环境与社会负效应不容忽视,各物流节点产生的粉尘、二氧化碳等大气污染源<sup>[9-11]</sup>,甚至含油废水、噪声以及硫酸、盐酸和易燃易爆的危险废弃物<sup>[12-13]</sup>,对空气质量、水环境、声环境、生态环境会造成不利影响,危及作业工人及周围居民身体健康<sup>[10,12,14]</sup>.同时,收集、运输等环节将消耗能源、排放污染物<sup>[15-16]</sup>,因此逆向物流网络设计应坚持可持续发展理念.

借鉴文献[17]对物流网络设计概念的界定,本文聚焦的可持续逆向物流网络设计(sustainable reverse logistics network design, SRLND)是指以经济、环境和社会目标中的至少两方面为导向,对消费地到再生资源、或废弃物的回收点、或适当处理地整个流通渠道的规划布局.既包含逆向物流运作设施位置、数量、容量以及物流节点间流量分配等物流网络设计的共性决策,同时参考张群等<sup>[6]</sup>的界定范围,将再生资源、废弃物或资源化产品的库存控制、回收车辆的路径优化、再生资源或资源化产品的定价与调度等与逆向物流网络设计高度关联的决策内容也考虑其中.此外,为了保证研究的完整性,将可持续闭环供应链网络设计研究一并纳入综述范围.相比传统逆向物流网络,可持续逆向物流网络设计在模型决策变量、目标函数、约束条件、求解算法及应用领域等方面呈现新特征,更具复杂性、多维性和不确定性.近年来随着对可持续发展的越发重视,可持续逆向物流网络设计问题逐渐成为研究热点.

现有研究缺乏对可持续逆向物流网络设计问题的全面综述,仅逆向物流、逆向供应链、逆向物流网络和闭环供应链等相关主题的综述文献中零散地覆盖了可持续逆向物流网络设计问题的少数论文,均未将这些论文独立出来作为单独的模块进行系统化的综述讨论,大多简单围绕目标函数的构成对环境和社会可持续逆向物流网络设计进行综述,且多在总结展望部分提出可持续逆向物流网络设计问题是未来研究的趋势和热点<sup>[16,17-20]</sup>.此外,现有相关领域综述文献较少涵盖近三年的论文,具体如表1所示.鉴于此,针对现有研究的不足,本文首次全面、系统地回顾可持续逆向物流网络设计问题相关研究现状,总结网络设计中经济、环境和社会目标的刻画与表达、模型构建及求解算法设计、不确定性以及产业应用等,并对未来研究方向进行展望.

表1 现有相关综述文献总结

文献	聚焦主题	综述内容	时间跨度/年份	关于SRLND综述	共享文献篇数
[6]	逆向物流网络设计	研究方法,定量模型,求解算法以及不确定环境考虑	1995~2016	将文献SRLND纳入	2
[17]	可持续供应链网络设计	环保型供应链网络设计;社会可持续供应链网络设计;模型构建;求解方法;应用	1991~2014	每个模块回顾了少量SRLND文献,不全面,缺乏近五年文献	14
[18]	废弃物逆向供应链网络设计	网络结构;决策变量;时间周期;约束条件;目标函数;应用;不确定性;求解方法;特殊之处	1995~2017	总结环境和社会可持续作为目标函数的刻画表达	8
[19]	电子废弃物逆向物流与闭环供应链	开/闭环物流网络设计;决策与绩效评估;概念框架;定性研究	1999~2017	综述目标函数构成及网络的开闭环结构	4
[20]	逆向物流与闭环供应链	不确定性;模型构建;求解方法;决策变量;周期;产品;目标函数	2007~2013	综述可持续多目标函数的构成	5

## 1 研究方法

Mayring提出的四阶段文献综述方法已被广泛采用<sup>[20]</sup>,本文借鉴该方法按文献收集、描述分析、分类选择和文献评价4个步骤进行文献综述.

## 1.1 文献收集

本文以“可持续(sustainable)”“循环经济(circular economy)”“生态(ecological)”“绿色(green)”“低碳(low carbon)”“碳交易(carbon market trading)”“碳足迹(carbon footprint)”“环境(environmental)”“社会(social)”“双/多目标优化/模型(bi/multi-objective optimization/model/approach)”“逆向供应链(reverse supply chain)”“逆向物流网络(reverse logistics network)”“闭环供应链(closed-loop supply chain)”“正逆向供应链网络(forward reverse supply chain network)”“回收网络(recovery network)”“逆向物流体系(reverse logistics system)”“逆向物流渠道(reverse logistics channel)”“设施选址(facility location)”作为关键词,并使用以下组合作为检索对象:

1) (“可持续(sustainable)”)and {“逆向供应链(reverse supply chain)”or“逆向物流网络(reverse logistics network)”or“闭环供应链(closed-loop supply chain)”or“回收网络(recovery network)”or“设施选址(facility location)”or“正逆向供应链网络(forward reverse supply chain network)”or“逆向物流体系(reverse logistics system)”or“逆向物流渠道(reverse logistics channel)”};

2) (“低碳(low carbon)”or“碳足迹(carbon footprint)”or“碳交易(carbon market trading)”)and {“逆向供应链网络(reverse supply chain network)”or“逆向物流网络(reverse logistics network)”or“闭环供应链网络(closed-loop supply chain network)”or“回收网络(recovery network)”or“设施选址(facility location)”or“正逆向供应链网络(forward reverse supply chain network)”or“逆向物流体系(reverse logistics system)”or“逆向物流渠道(reverse logistics channel)”};

3) (“环境(environmental)”or“循环经济(circular economy)”or“生态(ecological)”or“绿色(green)”)and {“逆向供应链网络(reverse supply chain network)”or“逆向物流网络(reverse logistics network)”or“闭环供应链网络(closed-loop supply chain network)”or“回收网络(recovery network)”or“设施选址(facility location)”or“正逆向供应链网络(forward reverse supply chain network)”or“逆向物流体系(reverse logistics system)”or“逆向物流渠道(reverse logistics channel)”};

4) (“社会(social)”)and {“逆向供应链网络(reverse supply chain network)”or“逆向物流网

络(reverse logistics network)”or“闭环供应链网络(closed-loop supply chain network)”or“回收网络(recovery network)”or“设施选址(facility location)”or“正逆向供应链网络(forward reverse supply chain network)”or“逆向物流体系(reverse logistics system)”or“逆向物流渠道(reverse logistics Channel)”};

5) (“双/多目标优化/模型(bi/multi-objective optimization/model/approach)”)and {“逆向供应链网络(reverse supply chain network)”or“逆向物流网络(reverse logistics network)”or“闭环供应链网络(closed-loop supply chain network)”or“回收网络(recovery network)”or“设施选址(facility location)”or“正逆向供应链网络(forward reverse supply chain network)”or“逆向物流体系(reverse logistics system)”or“逆向物流渠道(reverse logistics channel)”}.

检索数据库包括中国知网,Web of Science, Scopus, IEEE, Wiley Online Library 和 Emerald Group, 删除重复项后得到228篇文献(英文203篇,中文25篇). 对检索到的文献根据以下原则进行筛选: 1) 选择高级别中文期刊论文,即核心期刊、CSSCI/CSCD期刊和EI源刊的文章,共删除7篇; 2) 物流网络概念结构中不包含逆向物流活动,且模型的目标函数或约束条件中至少包含环境或社会影响测度,模型的决策变量必须涉及网络节点位置的选择,筛选后得到符合要求的文献98篇. 这些文献均为非综述文献,其中中文文献18篇,英文文献80篇.

## 1.2 描述分析

筛选得到的文献时间跨度为2004~2019年,90%以上发表于2009年以后(2015年以后占60%以上,具体如图1所示.

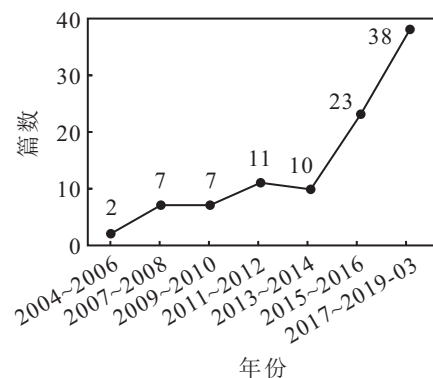


图1 被综述文献时间分布

这些文献涵盖50种期刊,其中英文期刊35种,中文期刊15种,如图2所示. 外文文献主要发表于3类刊物:一是资源、环境与可持续发展类,这是发文最多的一类,如Journal of Cleaner Production、Waste

Management、Resources, Conservation & Recycling等;二是运筹优化与运营管理类,如Omega、Computers & Industrial Engineering、International Journal of Production Research、European Journal of Operational Research、Applied Soft Computing、Applied Mathematical Modelling等;三是运输与物流类,如Transportation Research Part E、Logistics and Transportation Review、Journal of Transport and Supply Chain Management、Supply Chain Forum:

An International Journal、The International Journal of Logistics Management等.国内相关研究始于2006年,且均考虑经济和环境目标,缺乏对社会目标的考虑.国内期刊涵盖管理类、系统科学类、计算机类期刊,如《系统工程理论与实践》《中国管理科学》《管理工程学报》《系统工程》《工业工程与管理》《管理学报》《计算机集成制造系统》等.被综述文献来源期刊分布如图2所示(仅列出发文量大于等于2篇的期刊).



图2 被综述文献来源期刊分布

### 1.3 分类选择

本文所覆盖文献涉及可持续发展3个维度(经济、环境和社会)的分布情况如图3所示,该结果与其他可持续物流/供应链综述文献的描述基本一致(如文献[17,21]等).社会目标的研究与刻画不足,考虑经济与社会双目标或经济、环境与社会三目标的研究总体偏少.

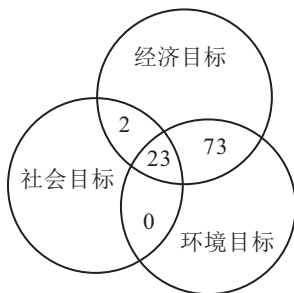


图3 被综述文献关于可持续3个维度的数量分布

### 1.4 文献评价

首先将收集到的文献用excel表格整理好,选择一个数据库,使用某一关键词组合在该数据库和excel表格中同时检索,得到相同的检索结果;然后换不同关键词组合在各数据库中多次实验,数据库中检索结果与excel表格中查找结果均一致,表明了文献的完整性和正确性.

后续结构的安排主要基于对现有相关领域综述论文的参考,并结合可持续逆向物流网络设计研究的特点进行.结合表1对现有相关综述论文进行总结发现,模型构建、不确定性环境研究、求解方法和工具

是本类综述性论文主要关注的领域<sup>[6,17-18,20]</sup>.具体地,可持续逆向物流网络设计与一般逆向物流网络设计相比,最主要的区别在于对环境或社会目标的考虑.考虑哪些环境与社会影响指标,以及如何定量测度环境与社会影响并有机融入数学模型中是研究的重点和难点<sup>[17]</sup>.鉴于此,本文首先开展“经济、环境与社会影响定量分析”的综述.合理的数学模型是解决可持续逆向物流网络设计问题的核心.该类问题的数学模型在决策变量、目标函数、约束条件方面呈现新的特征,考虑的因素更为复杂,对其系统综述有助于清晰认识该类问题的本质.同时,不确定性是逆向物流的重要特征,不确定环境下的可持续逆向物流网络设计更加符合现实场景,也是当前研究的重点和难点,是未来研究的趋势,本文也对此展开综述.此外,不确定环境下,考虑真实场景的多目标可持续逆向物流网络设计问题求解复杂,当前各类求解工具与方法创新的文献不断涌现,值得系统综述和总结.最后对可持续逆向物流网络设计模型的应用领域和地区进行了总结.注意到,本文后续章节对可持续目标刻画、模型构建、不确定环境分析、模型求解和应用进行的综述也体现了物流网络设计问题“建模-求解-应用”的一般逻辑体系.

## 2 经济、环境与社会影响定量分析

### 2.1 经济影响量化

可持续逆向物流网络设计,其经济因素多以利润(收益)最大化(22篇)或成本最小化(76篇)为目标.收

益类指标包括资源化产品销售收入(22篇)、政府补贴(5篇)、利用回收的再生资源做原材料带来的收益(2篇)以及笼统表示可持续行为的收益(3篇);对于成本类指标,一般考虑基础投资成本(固定成本)(98篇)、运输成本(98篇)、生产与处理成本(75篇)、库存成本(19篇)、废旧产品购买成本(16篇)、原材料采购成本(13篇)、设施能力利用不足导致的损失成本(4篇)、使用回收材料所节约的成本(4篇)、设备维护成本(2篇)以及信息处理成本(2篇)。但不同的逆向物流网络设计考虑的时间周期、产品类别以及资源化方法不同,因此模型中经济目标的考虑往往存在部分差异性。如:文献[13]考虑了多周期情形下再制造物流网络中回收中心、再制造工厂、再分销中心关闭成本。文献[22]考虑了钕铁硼磁铁回收网络中设施关闭成本和设施残值收益。文献[23]考虑了逆向物流网络未能满足客户需求的惩罚成本。文献[24]考虑了广告成本、新技术应用成本以及员工支持成本等,其中员工支持成本主要包括支持员工无息贷款、住房和教育补助的支出。文献[25]考虑了逆向物流活动参与主体环保意识提升成本、技术调整成本、设施处理能力利用不足带来的损失等。文献[26]考虑了电子垃圾回收中未达到处理或回收要求所产生的偏差成本(deviation cost)。文献[11]考虑了回收中心能力扩展的预期成本以及条件风险值成本(CVaR cost)。此外,文献[9]针对多周期情景,考虑了资金的时间价值,将不同周期的成本折算为现值。

## 2.2 环境影响量化

随着逆向物流活动环境影响日益显现,越来越多的学者将环境影响量化并以目标函数、约束条件或参数的形式融入逆向物流网络设计的数学模型中。环境影响包括积极影响和消极影响,其定量分析包括基于生命周期评价方法(life cycle assessment, LCA)的环境影响系统评价和非LCA方法的环境影响部分评价两类。

### 1) 基于LCA的环境影响评价。

根据ISO14040和ISO14044标准,LCA评价过程主要包括目标与范围界定、清单分析、影响评价和结果解释4个阶段<sup>[17]</sup>。该方法能够系统评价从原材料获取、产品生产直至使用后处置等各个阶段的环境影响。但在实际应用中,详尽的LCA分析需要大量基础数据,耗时长,成本高,且对环境领域专业知识要求高<sup>[10, 17, 27-28]</sup>,因此多数研究仅关注最主要的环境影响领域和结果指标。被综述的14篇应用LCA评价逆向物流网络环境影响的文献中,详尽LCA分析范围

多界定为“工厂门口到坟墓”(gate-to-grave)<sup>[17, 29]</sup>。聚焦主要环节和结果指标的LCA分析,其范围包括设施开放<sup>[30-32]</sup>、产品制造<sup>[30, 32-36]</sup>、运输<sup>[22, 29-32, 34-38]</sup>、回收处理<sup>[29-31, 34-38]</sup>、资源化利用<sup>[30, 34-37]</sup>、填埋<sup>[33, 36, 39]</sup>、焚烧<sup>[33, 36-37, 39]</sup>等环节,其中运输环节涵盖原材料运输、产成品运输以及回收利用过程中的运输,资源化利用包括再循环和再制造。此外,文献[30, 33]考虑使用回收材料代替原生材料获得的环境效益,文献[34]考虑废旧轮胎废弃(不被回收)的环境影响,文献[30]考虑装卸搬运和产品自身产生的环境影响。具体的评价方法和工具包括Eco-indicator 99<sup>[14, 29, 33, 35-38]</sup>、ReCipe<sup>[30-31]</sup>、TRACI 2.1<sup>[22]</sup>、IPCC准则<sup>[34]</sup>和Eco-invent 2.2 database<sup>[39-40]</sup>等,这些方法能够较好地评价结果引入环境目标函数中。对于评价结果的输出,中点指标法(midpoint indicator)能够阐释逆向物流活动所产生的各个方面的环境影响,如温室效应、自然资源枯竭、水体富营养化、土地酸化等。如:文献[39]将污水污泥处理网络中的环境影响分为气候变化、人体毒害、化石燃料消耗、矿物资源消耗和生物毒性等;文献[22]将钕铁硼磁铁回收中的环境影响输出分为全球变暖潜力值(GWP)、富营养化和酸化。终点指标法(endpoint indicator)将各类环境影响整合为对人类健康、生态系统和资源消耗的影响<sup>[29-31, 35-38]</sup>。在聚焦主要结果指标的LCA分析中多选择气候变化<sup>[34, 39]</sup>、碳足迹<sup>[32, 40]</sup>等结果指标。

### 2) 非LCA方法的环境影响部分评价。

LCA方法应用具有较高的条件性,加之企业对逆向物流活动环境影响的认知具有过程性,因此被综述文献中共82篇采用非LCA方法进行环境影响的部分评价。主要考虑设施建设与开放、运输、产品生产加工与回收处理等带来的温室气体排放、废弃物、能源消耗、材料回收等正、负环境影响。

运输作为温室气体的主要来源之一,其环境影响易于评价,是最主要的考虑领域,共有53篇文献对此分析。运输活动环境影响包括碳足迹(50篇,如文献[24-25]等)、能源消耗(7篇,如文献[41-42]等)和噪音污染(3篇,包括文献[43-44]等),与车型<sup>[15, 24, 45-51]</sup>、运输方式<sup>[25, 52-54]</sup>、运输距离<sup>[44-45, 52, 55-57]</sup>、运量<sup>[49, 55-56]</sup>、路况<sup>[15]</sup>、空驶<sup>[58]</sup>以及空气摩擦系数<sup>[15]</sup>等因素有关。回收处理是逆向物流网络环境影响考虑的又一重要领域,共有42篇文献对此分析,主要包括存储<sup>[26, 59-61]</sup>、搬运<sup>[46]</sup>、检查<sup>[46, 48, 62]</sup>、拆解<sup>[44, 62]</sup>、修复<sup>[63]</sup>、再循环<sup>[48, 59]</sup>、再制造<sup>[44, 53-54]</sup>、焚烧<sup>[59, 64]</sup>、填埋<sup>[60, 64-65]</sup>和废弃处置<sup>[63, 66]</sup>等活动,产生碳排放等环境影



响<sup>[24, 48, 63, 67-70]</sup>, 其影响程度与回收产品类型<sup>[63]</sup>、技术选择<sup>[11, 46, 48, 69]</sup>和质量<sup>[62]</sup>相关. 生产制造领域的环境影响主要存在于可持续闭环供应链网络设计中, 共有17篇文献对此分析. 该类影响主要与产品类型<sup>[63]</sup>、疾病爆发(农产品供应链)<sup>[66]</sup>和技术选择<sup>[24, 46, 48]</sup>相关. 设施领域的环境影响共有17篇文献对此分析, 主要包括配送中心、生产中心、回收中心、循环中心、再制造中心或处理中心等建设产生的碳排放(二氧化碳当量)<sup>[60-61, 63, 69, 71-73]</sup>或综合环境影响<sup>[46, 70]</sup>, 多作为固定环境影响分析<sup>[46, 63]</sup>, 与设施容量<sup>[61, 73]</sup>和技术选择<sup>[11, 70]</sup>相关. 此外原材料供应<sup>[60, 71]</sup>、设施间产品交易<sup>[74]</sup>、技术采用<sup>[53-54, 75]</sup>等活动以及材料<sup>[61, 75]</sup>和产品自身<sup>[24, 46, 62, 70, 76]</sup>也被视为环境影响输出的重要来源. 对于环境影响评价指标, 除上述主要提及的碳足迹、能源消耗和废弃物等, 还包括回收利用的废旧产品<sup>[24, 46, 62, 70, 76]</sup>以及清洁材料和清洁技术使用<sup>[75, 77]</sup>带来的环境正效用, 且均使用综合环境效应指标表示.

非LCA方法的环境影响部分评价数学模型中, 以3种形式刻画环境影响: 单一目标函数、目标函数和约束条件、单一约束条件. 目标函数以碳排放量(成本)最小<sup>[24-25]</sup>、综合环境绩效大小(正效应最大/负效应最小)<sup>[10, 46, 70]</sup>和能源消耗最小<sup>[41-42, 78]</sup>为主, 约束条件包括碳排放限制<sup>[63, 67]</sup>、能源消耗限制<sup>[16]</sup>、填埋量限制<sup>[65]</sup>、环境总体达标限制<sup>[79]</sup>和回收与处理量<sup>[27, 80]</sup>等. 此外, 文献[27, 80-82]构建目标规划模型, 分别以回收量偏差最小<sup>[27, 80-81]</sup>、碳排放量偏差最小<sup>[82]</sup>和处理量偏差最小<sup>[27]</sup>为目标. 文献[83]以二氧化碳减少带来收入增加作为环境目标; 文献[76]综合考虑了温室效应最小、填埋占地最小、能耗回收最大和材料回收最大等多个目标; 文献[64]以未被回收废弃物最少, 填埋的废弃物最少和焚烧排放最少为环境目标, 以有毒物质排放限制为约束; 文献[47]以租用车辆数最少为环境目标; 文献[62]以碳排放当量最小和成本节约最大为环境目标.

### 2.3 社会影响量化

相比丰富而深入的环境可持续研究, 社会可持续研究相对不足<sup>[17, 82, 84-86]</sup>, 仅有25篇文献对此做了分析. 将社会可持续纳入逆向物流网络设计中能够更好地评估逆向物流活动对员工、客户及社区等相关参与主体的影响, 实现定性与定量决策的统一. 目前关于社会可持续仍无准确定义<sup>[10, 86]</sup>, 对其测度主要通过相关指南和标准予以简化, 如《产品生命周期社会影响评价指南》(UNEP-SETAC 2009)、《可持续发展报告指南》(GRI, 2011)、ISO 26000《社会责任指

南》《企业社会责任标准SA8000: 2014》《全球契约》(UNGC, 2007)和《世界发展指标》(世界银行, 2016). 这些指南或指标提出了社会可持续分析框架, 主要包括就业机会、员工安全、当地发展、劳动条件等. 本文从社会可持续利益相关者的角度对现有研究综述如下:

#### 1) 员工方面.

就业机会是最主要的社会可持续衡量指标, 共有15篇文献对此刻画, 但具体存在细微差异. 文献[15, 37-38, 82, 86]将设施开放运营创造的就业机会作为指标. 文献[14]将废旧电子电器产品多元化处理创造的就业机会作为指标. 进一步地, 文献[11, 31, 46, 70-71, 87-88]将就业机会分为临时性就业机会(variable job opportunities)和长期就业机会(fixed job opportunities), 其中临时就业机会主要依赖于产能的扩张, 如文献[24]将生产工厂、回收中心、再制造中心和处理中心扩充产能新增的就业机会作为指标. 此外, 文献[25]通过考虑设施开放与关闭导致的就业机会增减变化来体现社会可持续目标. 员工安全方面, 共有12篇文献刻画分析, 具体包括文献[10, 14, 38, 86]直接以员工伤害作为指标, 认为废旧产品回收处理时, 工人暴露于危险环境中, 导致健康受损. 更多文献则采用损失工作日(lost days)指标, 该指标表示工人受伤害失能的工作时间. 文献[11, 31, 37, 46, 70, 88]将设施建设、企业运营过程中损失工作日作为评价指标. 此外, 部分研究还特别提到损失工作日产生的原因, 文献[23]将工厂、回收中心以及循环中心开放中事故发生导致的损失工作日作为评价指标; 文献[24]将员工生病与事故导致的损失工作日作为评价指标. 此外, 员工满意度<sup>[24]</sup>、司机最长工作时间<sup>[58]</sup>和员工培训<sup>[87]</sup>也被作为社会可持续指标.

#### 2) 社区与客户方面.

本部分共有10篇文献刻画分析, 其中文献[14-15, 38, 86]将当地发展作为社会可持续衡量目标. 客户方面, 文献[33, 41]以客户服务水平为约束条件反映社会可持续目标; 文献[27]将对报废汽车车主和逆向物流运作资金补偿作为社会目标刻画; 文献[23]以最大化满足客户需求为社会目标; 文献[10]以产品质量保障客户健康和安全性为社会目标. 此外, 产品危害(风险)<sup>[24, 38]</sup>、供应商关系<sup>[10]</sup>、社会支持水平<sup>[89]</sup>、生产商社会责任拓展以及经济福利<sup>[62]</sup>也被作为社会可持续测度指标.

同时, 社会可持续涉及主体多, 且诸多指标不易量化, 加之社会影响与环境影响有时存在交织(如员

工安全、健康与工作环境密切相关;客户健康与产品环境属性密切相关),因此社会因素融入逆向物流网络设计中大大增加了模型的复杂性. 现有研究根据社会可持续评价指标多为定性因素的特点,采用多属性决策方法评价,其中层次分析法(AHP)是广泛的方法之一<sup>[10, 14, 38, 86]</sup>. 但如何丰富和选择适合的指标并有机融入逆向物流网络设计模型中,是未来研究需要突破的难点.

### 3 数学模型

可持续逆向物流网络设计数学模型主要为混合整数线性规划模型,同时还包括混合整数非线性规划模型<sup>[13, 33, 44, 47, 74]</sup>、混合整数二次规划模型<sup>[63]</sup>、混合整数目标规划模型<sup>[80, 82]</sup>以及纯整数规划模型<sup>[90]</sup>. 此外,部分研究考虑不确定因素,构建随机混合整数规划模型<sup>[30, 33, 67, 73, 88]</sup>、动态混合整数规划模型<sup>[91]</sup>等. 具体关于模型的决策变量、目标函数与约束条件等构成要素综述如下.

#### 3.1 决策变量

参考文献<sup>[18, 92]</sup>的分类,本文分设施、运输、经营3个领域对经济、环境和社会决策变量归纳、梳理,得到可持续逆向物流网络设计模型决策变量见表2.

表 2 可持续逆向物流网络设计数学模型决策变量

	经济决策	环境决策	社会决策
设施领域	设施是否被选择(指派)或建设(开放) <sup>[30, 34, 77]</sup> , 设施容量(能力)是否被扩充 <sup>[11, 24, 36, 45, 66]</sup> , 设施处理能力大小设定 <sup>[11, 22, 27, 29, 67]</sup>	设施建设的碳排放量 <sup>[72-73]</sup>	设施建设时因事故的损失工作日数量 <sup>[23]</sup>
运输领域	节点间运输通道是否建立 <sup>[25, 34, 47, 53, 54]</sup> , 运输模式选择 <sup>[53, 54, 71]</sup> , 车辆是否属于某节点 <sup>[58]</sup> , 节点是否在某路径上 <sup>[58]</sup> , 节点间物流量 <sup>[22, 63, 67, 69]</sup> , 车辆指派决策 <sup>[29]</sup> , 节点间车辆安排数 <sup>[15, 24, 26, 46, 62]</sup> , 超载量 <sup>[62]</sup>	运输的碳排放量 <sup>[72-73]</sup> , 节点车辆租赁数 <sup>[47]</sup> , 各种废弃物运量 <sup>[76]</sup>	回收工厂到客户区的运量 <sup>[33]</sup>
经营领域	政策选择 <sup>[62]</sup> , 技术选择 <sup>[24]</sup> , 产品是否被回收或处理 <sup>[14, 80, 82, 86]</sup> , 风险值 <sup>[11]</sup> , 是否使用特定类型集装箱 <sup>[78]</sup> , 生产时间 <sup>[24]</sup> , 周期时长 <sup>[24]</sup> , 投资 <sup>[11]</sup> , 广告预算 <sup>[24]</sup> , 产成品或回收品库存量 <sup>[13, 34, 41, 48, 50, 59, 62, 83, 93]</sup> , 生产量或回收处理量 <sup>[24, 30, 34, 40, 48, 73, 75, 83, 93]</sup> , 产品价格与折扣 <sup>[24]</sup> , 延期未交货量 <sup>[50]</sup>	碳配额 <sup>[45, 93]</sup> , 碳券购买或销售量 <sup>[34]</sup> , 废弃物产生率 <sup>[83]</sup> , 偏差 <sup>[26-27, 30, 81, 88]</sup> , 各种资源化处理方法的比例 <sup>[64]</sup>	雇佣的工人数 <sup>[82]</sup>

根据前文综述范围的界定以及供应链管理分为战略、战术和运营层决策的思路<sup>[94]</sup>,表2中的决策变量除战略类决策变量外,还包含部分战术和运营类决策变量,战略层决策多为0-1变量,战术和运营层决策多为连续性变量. 同时,现有环境和社会影响的测度大多也通过经济决策变量来刻画,如以节点间运量为基础计算运输中的碳排放、以废弃物处理量为基础计算提供的就业岗位数等. 具有明显特征的环境和社会决策变量较少.

#### 3.2 目标函数

可持续逆向物流网络设计数学模型目标函数分为单目标函数和多目标函数两类. 被综述文献中单目标函数均考虑经济和环境目标,实现利润最大化(成本最小化). 具体包括两种情况:一是目标函数中仅考虑经济目标,环境影响通过约束条件反映. 文献<sup>[67, 95]</sup>以利润最大化为目标,碳配额限制为约束条件反映环境影响,文献<sup>[73, 96]</sup>分别以成本最小化和利润最大化为目标,碳排放限制为约束;二是目标函数中经济目标与环境目标同时考虑,该情况下环境目标货币化,再与经济目标求和得到反映成本或效益的单目标函数,文献<sup>[52, 55, 97-99]</sup>将运输中碳排放量转化为货币成本作为环境目标,文献<sup>[42, 45, 61, 72]</sup>以碳交易成本最小作为环境目标,文献<sup>[83]</sup>以二氧化碳减少带来的货币收益增加作为环境目标,文献<sup>[100-101]</sup>以政府对过量污染的经济惩罚作为环境目标.

多目标函数多在经济目标的基础上通过加入环境或社会目标扩展得到,各不同目标分别单独表达. 根据图3对经济、环境与社会目标研究总体情况的展现,仅文献<sup>[88, 102]</sup>同时考虑经济和社会目标. 其中文献<sup>[88]</sup>以物流系统总成本最小为经济目标,就业机会最大化和工作损失最小化为社会目标. 此外,部分文献在经济、环境或社会目标的基础上,还考虑其他目标. 如文献<sup>[51]</sup>将供应商绩效最大化作为目标之一;文献<sup>[23, 82]</sup>将最大化满足客户需求作为目标之一;文献<sup>[80]</sup>将纸张回收质量作为目标之一;文献<sup>[82]</sup>考虑了回收数量目标;文献<sup>[94]</sup>将配送与回收中心、再制造与修复中心以及处理与循环中心作业生产线上机器数量最少作为目标之一.

#### 3.3 约束条件

可持续逆向物流网络设计数学模型的约束条件主要包括数量类约束、设施相关约束、运输相关约束、服务约束、逻辑关系约束和体现可持续目标的碳排放约束、社会目标绩效约束以及二进制约束和非

负约束等,具体如表3所示.

表3 可持续逆向物流网络设计数学模型主要约束条件

类别	约束条件
数量约束	流量平衡约束,废弃物产生地库存水平约束 <sup>[83]</sup> ,回收量约束 <sup>[22,47,81,98]</sup> ,产量平衡约束 <sup>[30,70,95]</sup>
设施约束	设施容量约束 <sup>[33,35,51,61,89,103]</sup> ,设施建设(开放)数量约束 <sup>[11,29,34,71,72,76,103]</sup> ,设施利用率限制 <sup>[10,29,65,103]</sup> ,设施最多被赋予一个容量水平的约束 <sup>[10,14,38,44,86]</sup> ,设施规模唯一性约束 <sup>[61]</sup> ;处理设施规模大小约束 <sup>[64]</sup> ,设施处理能力要求限制 <sup>[26,76]</sup> ,处理设施类型限制 <sup>[14,86]</sup> ,不同层级设施隶属关系约束 <sup>[89]</sup> ,设施扩建量范围约束 <sup>[45]</sup> ,设施存储能力约束 <sup>[13,36]</sup>
运输约束	车辆载重约束 <sup>[24,29,36,46,47,52]</sup> ,车辆数约束 <sup>[62]</sup> ,行程次数约束 <sup>[33]</sup> ,运输模式选择约束 <sup>[48]</sup> ,路由运输容量约束 <sup>[103]</sup> (由运输模式、运输频率和出发地设施容量决定),最大行驶距离限制 <sup>[47]</sup> ,出发地与目的地闭合约束 <sup>[47,58,101]</sup>
服务约束	需求满足约束 <sup>[34-35,51]</sup> ,服务水平约束 <sup>[41]</sup> ,设施服务(覆盖)半径约束 <sup>[104-105]</sup> ;完全回收约束 <sup>[34-35,72,103]</sup> ,客户区被覆盖约束 <sup>[30,48,70,91]</sup> ,法定最低回收率限制 <sup>[24,26]</sup>
逻辑关系约束	候选设施被选择(建设)且容量满足的前提下进行作业或运输活动的约束 <sup>[24,30,59,70,71,73,81,88,90,99,106-108]</sup> ,设施开设与关闭以及是否扩建的逻辑关系表达 <sup>[45]</sup> ,节点建设与流量存在性之间的关系约束(节点必须建设在有流量存在的地方,流量发生于存在设施的地方) <sup>[47,93]</sup> ,每个回收中心仅被经过一次的约束 <sup>[47]</sup>
产品相关约束	产品价格上限约束 <sup>[24]</sup> ,产品被指定流向的约束 <sup>[51,90,93,106]</sup> ,不同资源化处理方法比例约束 <sup>[31,50,65,67,71,75,81,109]</sup>
其他约束	二进制约束和非负约束,碳排放(碳配额)约束,预算约束 <sup>[10,11,24,79,88]</sup> ,技术选择约束 <sup>[24,30,31,36-37,48,70,71,88]</sup> ,折扣约束 <sup>[48]</sup> ,风险约束 <sup>[11,30]</sup> ,物流网络社会绩效大于特定值的约束 <sup>[10]</sup> ,信息处理量约束 <sup>[56]</sup>

此外,在多周期数学模型中,还包括不同周期设施开放的连续性约束<sup>[10,23,34,36,41]</sup>、连续周期库存量变化的平衡约束<sup>[83,109]</sup>、设施开放的周期时长和每个周期至少一个设施开放的约束<sup>[23]</sup>、规划周期内回收点开展回收活动次数的约束<sup>[58]</sup>以及在期初设施不发生能力扩展,其产能等于设施容量的约束<sup>[11]</sup>.

### 3.4 其他

根据所考虑的时限不同,可持续逆向物流网络设计数学模型分为单周期和多周期两类.单周期模型仅考虑当前阶段并采用已有相关数据进行网络规划,被综述文献中大约三分之二为单周期模型.多周期模型考虑更长规划时限,包括几周、几个月甚至几年不等,一般涵盖2~20个周期<sup>[17]</sup>.该类模型既考虑逆向物流网络当前阶段的运行状况,同时对未来需求进行预测.如文献[41]以12年为规划时限构建可持续石材闭环供应链网络,考虑新产品和废弃物产量以每年5%的速度增长.文献[82]以12个月为周期构

建可持续电子废弃物逆向物流网络,每月目标回收率设定为销售量的5%.多周期可持续逆向物流网络设计多在初始阶段制定战略层决策且较为稳定,不易改变,与之相应的战术层决策在后续周期可能存在调整<sup>[17]</sup>.此外,现有研究中共有34篇文献考虑多产品情形建立可持续逆向物流网络设计模型.由于不同产品具有不同属性特征和回收、处理方法,基于多产品的可持续逆向物流设计模型复杂性大大增加.如文献[73]将废旧电子电器产品分为A、B、C三类,并综合考虑不同产品回收价格、回收数量和不同资源化处理比例等的差异性,构建不确定环境下多周期、有容量限制的可持续逆向物流网络.再如,文献[98]考虑两种不同类型的废旧电器产品组成部件、重量、运输成本以及废弃处理成本等方面的不同,设计多周期可持续逆向物流网络.

## 4 不确定环境研究

不确定性是逆向物流的重要特点之一,正成为越来越多可持续逆向物流网络设计数学模型考虑的因素.为了客观反映真实环境的不确定性并有效处理,不确定因素寻求与解决方法的合理选择是关键.

可持续逆向物流网络设计中不确定因素主要包括废旧产品回收与资源化产品需求类因素、成本与价格类因素和技术参数类因素.废旧产品回收与资源化产品需求是考虑最多的因素<sup>[17,20]</sup>,包括回收量<sup>[65,74,81,87,106]</sup>、回收率<sup>[30,37,91]</sup>、废弃物产生率<sup>[67,73,83,95]</sup>、资源化产品需求量(如再制造产品需求)<sup>[11,13,23,30,37,45,68-69,74-75,95,110-111]</sup>等.成本与价格类因素包括运输成本<sup>[45,69,112]</sup>、废旧产品存储费用<sup>[91]</sup>、回收价格<sup>[22,73,95]</sup>、资源化产品销售价格<sup>[65,67,73]</sup>、被回收的能源价格<sup>[65,67]</sup>、设施建设成本<sup>[15,37]</sup>、废旧产品处理成本<sup>[37]</sup>、汇率<sup>[112]</sup>、投资率<sup>[11]</sup>等.技术参数类因素包括废旧产品质量<sup>[45,65,110]</sup>、再制造率<sup>[91]</sup>、延迟<sup>[15]</sup>、设施容量(能力)<sup>[15,37,40]</sup>等.此外,部分文献还考虑了消费者的期望<sup>[95]</sup>、风险<sup>[88]</sup>和社会影响<sup>[23]</sup>的不确定性.

对于不确定问题的解决主要通过情景分析<sup>[11,73,110]</sup>、随机规划<sup>[30,73,88]</sup>、模糊理论<sup>[16,23,37,68,79,87]</sup>、鲁棒优化<sup>[45,95,112]</sup>等方法.其中随机规划考虑参数的概率分布是较为常用的方法之一<sup>[67,73-75]</sup>,机会约束规划<sup>[13,81,83]</sup>和二阶段随机规划<sup>[11,30,65,88]</sup>作为随机规划的重要类型被广泛采用.部分学者结合使用上述方法,通过模糊随机规划模型、鲁棒模糊规划模型等解决不确定问题.文献[69]应用鲁棒模糊规划方法分析可变成本与需求率的不确定性对铜产业闭环供应链网络设计模型的影



响;文献[109]集成采用模糊数和随机规划寻求不确定环境下铅蓄电池闭环供应链网络设计的优化方案;文献[110]考虑市场需求量、废钢回收量以及回收产品质量的不确定性,构建多目标随机规划模型,运用情景分析法求解;文献[95]建立分布式鲁棒优化模型和自适应鲁棒模型以解决闭环供应链中废弃物处理设施选址面临的多种不确定性。

## 5 求解工具和方法

可持续逆向物流网络设计考虑经济、环境或社会目标,同时随着多周期、多产品、不确定性、非线性等因素逐渐加入,模型在贴近实际的过程中对求解方法提出了更高的要求。可持续逆向物流网络设计属于多目标规划问题,其数学模型的目标函数为单目标或多目标。对于多目标函数求解主要通过统一目标函数法、 $\varepsilon$ 约束法( $\varepsilon$ -constraint method)、智能优化算法等。该类问题的求解工具包括 CPLEX、LINGO/LINDO、AMPL 等软件。

### 5.1 单目标函数求解方法

如第2.3节所示,部分研究将环境影响作为约束条件或货币化后构建单目标函数。该类问题主要运用 LINGO<sup>[44, 55, 67, 72-73, 98-99]</sup>、LINDO<sup>[52]</sup>、CPLEX<sup>[10, 42, 45, 61, 76, 96, 100, 113]</sup>、IBM LogicNet Plus 7.1<sup>[97]</sup>、Llama Soft Supply Chain Guru 8.0 Fico Xpress Optimization solver<sup>[93]</sup>、CVX<sup>[95]</sup>等软件得到精确解,或采用遗传算法(genetic algorithm, GA)<sup>[50, 56]</sup>、两阶段分解算法(2-PDAH)<sup>[90]</sup>等启发式算法进行网络设计。

### 5.2 多目标函数求解方法

#### 1) 统一目标函数法。

该方法将原目标函数中的各个分目标函数通过一定的方法转化为统一目标函数,并作为多目标优化问题的评价函数,再利用单目标函数优化方法求解<sup>[57]</sup>。转化方法包括加权和法<sup>[13, 16, 42, 57, 65, 71, 74, 77-78, 103, 107]</sup>、乘法<sup>[104]</sup>、全局准则法<sup>[25]</sup>、Lp-度量法<sup>[48]</sup>、多目标模糊优化法<sup>[16, 24, 51, 79, 87, 105]</sup>和归一化法线约束法(normalized normal constraint method, NNCM)<sup>[59]</sup>等。其中,加权和法简单有效,但受决策者的偏好影响较大,同时易因决策者先验知识不足难以找到满意的 Pareto 最优解或近似解。此外,该方法对非凸空间较敏感<sup>[114]</sup>。乘法适用于目标函数中既有求最大又有求最小的多目标优化问题,但应用该方法转化得到的目标函数较为复杂,增加了求解难度。全局准则法利用平方和加权形式使各目标尽可能逼近其想象最好值,但虚拟目标和权重系数有时不易准确设定。Lp-度量法能够使任

意解与最优解的差距最小,但各目标权重的设定主观性较强。模糊优化法能将各种无法准确定义的参数采用模糊集合表示,表达形式多样,数据结构柔性,适应性强,缺点在于模糊评价的主观性强,该方法适用于模型中存在参数不确定的情形。归一化法线约束法通过重构与划分多目标问题的可行域,易于获得均匀分布的帕累托前沿。上述方法具体应用如下:文献[57]分别使用加权和法、加权切比雪夫法和增广加权切比雪夫法将基于成本和碳排放的双目标转化为单目标,并运用 CPLEX 12.4 求解;文献[104]以总成本最小和产地到最近处理站距离最大为目标,考虑到两类目标期望相反,通过成本目标除以距离目标将多目标转化为单目标,并使用 LINGO 8.0 求解;文献[25]将成本、碳排放和社会福利3个目标通过全局准则法转化为单目标,并利用 CPLEX 软件求解;文献[48]运用 Lp-度量法将总成本、碳排放和顾客满意度3个目标转化为单目标,并利用 CPLEX 12.6 求解;文献[16]以成本和环境污染最小构建多目标函数,并综合使用目标规划法、加权和法和模糊多目标优化法求解;文献[59]采用归一化法线约束法将包含成本和环境影响的多目标转化为单目标,并采用 AMPL 软件求解。

#### 2) $\varepsilon$ 约束法( $\varepsilon$ -constraint method)。

该方法从多个目标中选择一个目标作为主要目标,其他目标给定期望值后转化为约束条件,即通过约束条件的形式保证其他目标不会太差,进而使原多目标函数转化为单目标函数<sup>[115]</sup>。该方法能够重点保证某一目标的实现,同时又适当照顾了其他目标,但得到的最优解为原多目标优化问题的 Pareto 弱有效解,且针对有些目标的期望值不易给定,或目标间主次错综复杂的情形使得该方法无法解决,因此该方法主要适用于多个目标的重要程度显著不同、目标的期望值易于得到的情形。具体如文献[116]以利润最大化为主要目标,以绿色绩效、产品缺陷率和准时交货目标为约束条件,通过 CPLEX 12.7.1.0 求解;文献[69, 112]以总成本最小为主要目标,将碳排放目标作为约束条件并设定其小于等于限定的额度,运用 CPLEX 软件求解;文献[65]对比使用加权和法和改进 $\varepsilon$ 约束法求解多目标函数,结果发现改进 $\varepsilon$ 约束法在生成非支配解方面更为有效,而加权和法计算时间更短。

#### 3) 智能优化算法。

该方法具有较高的并行性,能够一次运行求得多个 Pareto 最优解,且对所求问题的 Pareto 阵面形状和连续性不敏感<sup>[37]</sup>。该方法可以直接搜索解

集并不断更新 Pareto 前沿,效率高,一次可产生多个 Pareto 最优解或可行解,但搜索随机性强,相关约束条件较难满足,适用于规模较大的优化决策问题.具体包括 NSGA-II<sup>[37-38, 68, 86]</sup>、多目标粒子群算法(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)<sup>[37, 46, 53-54, 91]</sup>、多目标帝国竞争算法(multi-objective imperialist competitive algorithm, MOICA)<sup>[46, 70]</sup>、混合模拟退火算法(hybrid simulated annealing, HSA)<sup>[116]</sup>、可变邻域搜索算法(variable neighborhood search algorithm, VNS)<sup>[70]</sup>、蚁群算法(ant colony optimization, ACO)<sup>[49, 94]</sup>、森林数据结构算法(forest data structure algorithm, FDSA)<sup>[63]</sup>、布谷鸟算法(cuckoo optimization algorithm, COA)<sup>[46]</sup>、病毒群搜索算法(virus colony search, VCS)<sup>[30]</sup>、Keshtel 算法(Keshtel algorithm, KA)<sup>[30]</sup>等.现有研究往往将多种算法对比使用以证明所设计算法的优越性.文献[30]以总成本、碳排放和下行风险为目标,综合运用 VCS 和 KA 算法求解,并采用 VNS 和 GA 算法进行结果对比,最后通过约束方法进行小规模验证;文献[46]以总成本、环境影响和社会效应为目标构建

MILP 模型,并采用布谷鸟算法求解,同时该算法与 MOPSO 和 MOICA 算法在相同环境下进行对比,结果表明布谷鸟算法在诸多指标上全面优于后两种算法.

#### 4) 其他方法.

文献[27, 80-82]构建了可持续逆向物流网络的目标规划模型,采用 LINGO/LINDO 或 CPLEX 软件求解.目标规划法通过设定期望值在可行域内得到 Pareto 最优解,求解效率高,但缺点在于需要决策者首先设定目标函数的期望值且提前了解搜索空间形状,适用于线性目标函数优化,对非线性优化问题求解效率偏低.文献[47, 62]采用交互式多目标规划算法,该方法的优点是能够通过人为控制优化过程得到更符合问题本身的解,但同时要求决策者始终参与控制,实际操作困难.文献[64]通过参考点法(reference point method)求解多目标函数,以参考点为导向,缩小搜索范围,便于解的选择,但是只能找到参考点附近的优化解,无法得到完整的优化解,适用于解决高维多目标优化问题.综上,可持续逆向物流网络设计问题数学模型多目标函数求解方法与工具如表4所示.

表4 多目标函数求解方法与工具

方法类型	文献
加权和法	LINGO <sup>[13, 65, 74, 103, 107]</sup>
	CPLEX <sup>[16, 42, 57, 71, 75, 78]</sup>
	GLPK <sup>[77]</sup>
乘除法	LINGO <sup>[104]</sup>
全局准则法	CPLEX <sup>[25]</sup>
Lp-度量	CPLEX <sup>[48]</sup>
多目标模糊优化算法	LINGO <sup>[51, 79, 87, 105]</sup>
	GAMS <sup>[24]</sup>
	CPLEX <sup>[16]</sup>
$\epsilon$ 约束法	CPLEX <sup>[22, 30, 41, 58, 75, 82, 109-110, 112, 116]</sup>
	GAMS <sup>[11, 94]</sup>
	GA <sup>[23, 89]</sup>
	VCS <sup>[30]</sup>
	GLPK <sup>[77]</sup>
多目标进化算法	NSGA-II <sup>[37-38, 68, 86]</sup>
	MOPSO <sup>[37, 53-54, 91]</sup>
	HAS <sup>[117]</sup>
	ICA <sup>[46, 70]</sup>
	VNS <sup>[70]</sup>
	ACO <sup>[49, 94]</sup>
	FDSA <sup>[63]</sup>
	COA <sup>[46]</sup>
VCS+KA <sup>[30]</sup>	
目标规划法	LINGO/LINDO <sup>[27, 80-81]</sup>
	CPLEX <sup>[82]</sup>
	GAMS <sup>[26]</sup>
交互式方法	LINGO <sup>[47, 62]</sup>
归一化法线约束法	AMPL <sup>[59]</sup>
参考点法	LINGO <sup>[64]</sup>

## 6 应用

不同应用领域的逆向物流网络在结构特征、功能效用及环境或社会影响方面均存在较大的差异性,因此,现有可持续逆向物流网络设计研究大多基于特定应用或行业领域,仅少数研究通过构建适用于不同应用场景的通用模型解决逆向物流网络设计中的共性问题,这两类研究均以真实案例或数值算例为背景.实例研究以真实数据作为输入参数,在地图上输出物流节点的位置、数量及分配关系等网络设计结果;算例研究通过假设相关参数值,从理论层面验证模型的有效性.现有研究主要应用于废旧电子电器产品(WEEE)、报废汽车及相关产品、城市固体废弃物和矿产资源等产品类别.因为这些领域保有量大,增长速度快,逆向物流活动中经济、环境与社会影响显著,严重制约经济社会可持续发展.应用国家包括意大利、荷兰、英国、希腊等欧洲国家(含土耳其)和美国、加拿大等北美国家.此外,伊朗、印度、中国、埃及等发展中国家随着废旧产品数量的高速增长也成为研究应用的重要国度.如当前全球废旧电子电器产生量每年以高于其他废弃物3倍的速度增长,尤其是中国、印度等增速最快,低回收率造成的巨大环境与社会影响给这些国家带来了严峻的治理挑战<sup>[118-119]</sup>,亟需构建可持续逆向物流网络促进废旧产品有效回收.具体应用领域和国家如表5所示(表中国家表示实例发生地).

表 5 可持续逆向物流网络设计应用综述

对象	实例	算例
WEEE	印度 <sup>[47, 51, 62, 79, 87, 98]</sup> 加拿大 <sup>[116]</sup> 伊朗 <sup>[14, 86]</sup> 土耳其 <sup>[25, 42, 82, 120]</sup> 希腊 <sup>[78]</sup>	文献 [26, 73, 94, 107]
汽车及相关产品	报废汽车: 埃及 <sup>[27]</sup> , 英国 <sup>[71]</sup> , 土耳其 <sup>[96]</sup> , 中国 <sup>[99]</sup> 汽车发动机: 中国 <sup>[45]</sup> 轮胎: 伊朗 <sup>[38]</sup>	报废汽车: 文献 [55, 100] 轮胎: 文献 [31]
城市固废	大类别: 希腊 <sup>[76, 112]</sup> , 意大利 <sup>[16, 64, 108, 121]</sup> , 伊朗 <sup>[10, 83]</sup> , 中国 <sup>[117, 122]</sup> 包装物: 意大利 <sup>[59]</sup> 家具: 意大利 <sup>[60]</sup> 危险废弃物: 伊朗 <sup>[37]</sup> , 加拿大 <sup>[109]</sup> 灯泡: 伊朗 <sup>[24]</sup> 玻璃: 伊朗 <sup>[30]</sup> 塑料: 荷兰 <sup>[97]</sup> , 中国-欧洲 <sup>[93]</sup>	大类别: 文献 [90, 95, 104, 105, 112] 建筑废弃物: 文献 [11] 纸张: 文献 [63] 包装物: 文献 [101] 玻璃: 文献 [70]
矿产	采矿业-钙化石: 伊朗 <sup>[41]</sup> 黄金: 伊朗 <sup>[49]</sup> 钽铁硼磁体: 美国 <sup>[22, 68, 89]</sup>	铜: 文献 [75]
通用	—	文献 [23, 46, 48, 52, 57, 63, 65, 67] 文献 [72, 77, 88, 91, 103, 106]

## 7 总结与展望

综上所述,本文在系统回顾可持续逆向物流网络设计研究总体情况的基础上,总结了经济、环境与社会影响测度指标和方法,基于决策变量、目标函数和约束条件等探讨了现有研究数学模型结构特征,同时重点分析了现有逆向物流网络设计中不确定因素的考虑及处理方法.对数学模型求解方法和工具进行总结,提出了现有研究的应用情况.随着近年来全球再生资源数量及回收品类的大幅增长、政策法规的日趋严格、智能化回收技术与回收模式的创新以及新能源运载工具的广泛应用,可持续逆向物流网络设计研究正面临新的挑战,一些新问题值得进一步研究:

### 1) 经济、环境与社会影响定量分析方面.

总体上,同时考虑经济与社会可持续两重目标以及经济、环境与社会可持续三重目标的逆向物流网络设计研究较少,国内期刊更是缺少对社会目标研究的发文,具体如下:

① 经济影响方面.对多周期情形下的资金时间价值、设施设备的维护成本以及日益增长的人工成本等因素考虑较少,值得进一步拓展.此外,运输成本构成考虑较为单一,现有研究中运输成本多指燃油消耗成本,主要考虑运距、运量因素.根据文献[58]的成果,行驶速度、车辆类型以及道路拥堵情况对运输成

本也具有显著影响,且认为车辆维护成本是运输成本的重要组成部分.因此,综合考虑多因素影响,丰富运输成本构成内容值得进一步研究.

② 环境影响方面.较少结合再生资源或废弃物自身产品特征、回收处理活动特点展开针对性分析,对再生资源或废弃物从回收至资源化利用全过程中哪些环节主要产生环境影响分析不足.此外,在具体环境影响指标方面,对噪音、粉尘、污水及土壤污染等研究不足,大多关注碳排放等单一指标.未来将结合文献[67, 97, 103, 107]等的研究,针对性分析不同物品、不同资源化作业产生的各类逆向物流活动环境影响,进一步扩大测度环节和指标范围,综合考虑多环节、各类环境影响是研究拓展的重要方向.

③ 社会影响方面.现有社会可持续衡量指标较为单一,主要包括就业机会、员工安全和当地发展等,对员工学习与培训、公共健康与安全以及工作场所卫生条件等指标的考虑不足.由于社会影响不易定量测度,如何选择最合适的指标及测度方法、界定影响产生范围是当前研究面临的挑战.未来可以进一步扩展衡量指标,同时丰富和发展文献[10]等方法.

### 2) 数学模型方面.

① 决策变量方面.现有研究包括选址、运输以及经营领域的经济影响决策,具有显著特征的环境和社会决策变量考虑较少,值得进一步扩展.同时,现有

决策变量包含战略、战术及运营3个层面,但融合不够,尤其对设施选址、车辆路径与库存控制决策集成考虑较少.上述3个决策是逆向物流系统规划的关键要素,相互依赖,协同影响物流系统整体运作水平,因此,可持续目标下逆向物流系统选址-路径-库存集成优化问题值得进一步研究.此外,调度决策、定价决策等作为逆向物流决策的重要内容加入可持续逆向物流网络设计中可促进不同层面决策融合,拓展现有研究.

② 目标函数方面.现有研究主要考虑经济与环境可持续双目标,对经济、环境和社会可持续三目标研究不足.随着风险<sup>[30]</sup>、客户服务水平<sup>[23]</sup>等目标逐渐受到关注,可持续理念下逆向物流网络规划从双目标扩展至三目标甚至更多是未来研究的方向.约束条件方面,基于越库作业、按质量等级回收等真实逆向物流运作场景的约束条件考虑较少,值得进一步拓展.此外,基于多周期性、多产品的可持续逆向物流网络设计是未来研究的重点.

#### 3) 不确定环境研究方面.

现有研究主要考虑废旧产品回收与资源化产品需求类因素、成本与价格类因素以及技术参数类因素的不确定性,此外,可持续逆向物流网络设计还受到规划期内气候、区域人口规模与分布、政策法规、消费者行为、碳排放、道路交通情况、运输时间、回收时间以及处置率等因素变化波动的影响,这些因素现有研究均考虑不足.因此,基于不同回收产品特征和规划条件,综合考虑多种不确定因素以增强模型的应用性是未来研究的重点、难点和热点.对于不确定性问题的解决,现有研究多采用情景分析、随机规划、模糊理论或鲁棒优化等单一方法,较少对不同方法计算结果进行比较.此外,现有研究缺乏采用区间优化、模拟仿真等方法,未来研究可进一步探索和应用.

#### 4) 求解方法与工具方面.

现有研究问题规模普遍较小,多采用精确算法或启发式算法求解.随着问题规模的扩大,研究目标的增加以及多周期、多产品和不确定等更多现实因素的考虑,现有求解方法和工具的求解效率与结果精度需要进一步提高.针对性设计或采用更为高效、可靠的元启发式算法和精确算法是未来研究的重点.此外,为证明所设计算法的优越性,采用仿真优化技术、交叉熵等进行效能评估或算法间比较研究是未来的趋势.

#### 5) 可持续逆向物流网络应用方面.

现有研究主要应用于废旧电子电器产品、报废

汽车、城市固体废弃物等少数几类再生资源,且集中于欧洲、北美以及伊朗、印度等国,对新能源汽车动力电池、医疗废弃物、餐厨垃圾等关注较少.车用动力电池回收关乎国家能源安全且环境效应显著,是推动新能源汽车产业健康发展的关键.当前中国等国家车用动力电池进入规模化退役期,其回收利用迫在眉睫.此外,医疗废弃物与餐厨垃圾非法回收在中国、东南亚等长期存在,严重破坏生态环境,危害社会公共安全与人民健康.因此,聚焦中国、东南亚等人口密集、再生资源产量大且回收利用水平低的国家,瞄准车用动力电池、医疗废弃物与餐厨垃圾等关乎国计民生、影响可持续发展的重要且薄弱领域是未来应用研究的方向.

#### 参考文献(References)

- [1] Liu D W. Network site optimization of reverse logistics for E-commerce based on genetic algorithm[J]. *Neural Computing and Applications*, 2014, 25(1): 67-71.
- [2] Bouzon M, Govindan K, Rodriguez C M T, et al. Identification and analysis of reverse logistics barriers using fuzzy Delphi method and AHP[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, 108: 182-197.
- [3] Üster H, Easwaran G, Akçal E, et al. Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model[J]. *Naval Research Logistics*, 2007, 54(8): 890-907.
- [4] 周垂日,梁樑,许传永,等.逆向物流研究的新进展:文献综述[J]. *科研管理*, 2007, 28(3): 123-132.  
(Zhou C R, Liang L, Xu C Y, et al. A literature review on the new development of the reverse logistics research[J]. *Science Research Management*, 2007, 28(3): 123-132.)
- [5] 周根贵,曹振宇.遗传算法在逆向物流网络选址问题中的应用研究[J]. *中国管理科学*, 2005, 13(1): 42-47.  
(Zhou G G, Cao Z Y. A genetic algorithm approach to location-allocation problem in reverse logistic network[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2005, 13(1): 42-47.)
- [6] 张群,卫李蓉.逆向物流网络设计研究进展[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(9): 165-176.  
(Zhang Q, Wei L R. Advances in reverse logistics network design research[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2016, 24(9): 165-176.)
- [7] Mahmoudzadeh M, Mansour S, Karimi B. To develop a third-party reverse logistics network for end-of-life vehicles in Iran[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, 78: 1-14.
- [8] Phuc P N K, Yu V F, Tsao Y C. Optimizing fuzzy reverse supply chain for end-of-life vehicles[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 113: 757-765.
- [9] Korchi A E, Millet D. Designing a sustainable reverse logistics channel: the 18 generic structures framework[J].

- Journal of Cleaner Production, 2011, 19(6/7): 588-597.
- [10] Mirdar Harijani A, Mansour S, Karimi B, et al. Multi-period sustainable and integrated recycling network for municipal solid waste—A case study in Tehran[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 151: 96-108.
- [11] Rahimi M, Ghezavati V. Sustainable multi-period reverse logistics network design and planning under uncertainty utilizing conditional value at risk (CVaR) for recycling construction and demolition waste[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 1567-1581.
- [12] Wang L, Chen M. End-of-life vehicle dismantling and recycling enterprises: Developing directions in China[J]. JOM, 2013, 65(8): 1015-1020.
- [13] 丁于思, 李雪, 高阳. 多周期多目标再制造物流网络设施动态选址研究[J]. 管理学报, 2014, 11(3): 428-433. (Ding Y S, Li X, Gao Y. Multi-period and multi-objective dynamic location model for remanufacturing logistics network[J]. Chinese Journal of Management, 2014, 11(3): 428-433.)
- [14] Shokohyar S, Mansour S. Simulation-based optimisation of a sustainable recovery network for waste from electrical and electronic equipment (WEEE)[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2013, 26(6): 487-503.
- [15] Zhalechian M, Tavakkoli-Moghaddam R, Zahiri B, et al. Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 89: 182-214.
- [16] Galante G M, Aiello G, Enea M, et al. A multi-objective approach to solid waste management[J]. Waste Management, 2010, 30(8/9): 1720-1728.
- [17] Eskandarpour M, Dejax P, Miemczyk J, et al. Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review[J]. Omega, 2015, 54: 11-32.
- [18] Engeland J V, Beliën J, Boeck L D, et al. Literature review: Strategic network optimization models in waste reverse supply chains[J]. Omega, 2020, 91: 102012.
- [19] Tasbirul I M, Nazmul H. Reverse logistics and closed-loop supply chain of waste electrical and electronic equipment (WEEE)/E-waste: A comprehensive literature review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 137: 48-75.
- [20] Govindan K, Soleimani H, Kannan D. Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 240(3): 603-626.
- [21] Ghadimi P, Wang C, Lim M K. Sustainable supply chain modeling and analysis: Past debate, present problems and future challenges[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 140: 72-84.
- [22] Jin H Y, Song B D, Yih Y, et al. A bi-objective network design for value recovery of neodymium-iron-boron magnets: A case study of the United States[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 211: 257-269.
- [23] Soleimani H, Govindan K, Saghafi H, et al. Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design[J]. Computers and Industrial Engineering, 2017, 109: 191-203.
- [24] Taleizadeh A A, Haghghi F, Niaki S T A. Modeling and solving a sustainable closed loop supply chain problem with pricing decisions and discounts on returned products[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 163-181.
- [25] Temur G T, Bolat B. Evaluating efforts to build sustainable WEEE reverse logistics network design: Comparison of regulatory and non-regulatory approaches[J]. International Journal of Sustainable Engineering, 2017, 10(6): 1-26.
- [26] Li R C, Tee T J C. A reverse logistics model for recovery options of E-waste considering the integration of the formal and informal waste sectors[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, 40: 788-816.
- [27] Harraz N A, Galal N M. Design of sustainable end-of-life vehicle recovery network in Egypt[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2011, 2(3/4): 211-219.
- [28] Pishvae M S, Razmi J. Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(8): 3433-3446.
- [29] Duque J, Barbosa-Póvoa A P F D, Novais A Q. Design and planning of sustainable industrial networks: Application to a recovery network of residual Products[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2010, 49(9): 4230-4248.
- [30] Fathollahi-Fard A M, Hajiaghahi-Keshteli M. A stochastic multi-objective model for a closed-loop supply chain with environmental considerations[J]. Applied Soft Computing, 2018, 69: 232-249.
- [31] Navid S, Mohammad F F A, Mostafa H K. Sustainable tire closed-loop supply chain network design: Hybrid metaheuristic algorithms for large-scale networks[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 196: 273-296.
- [32] Krikke H. Impact of closed-loop network configurations on carbon footprints: A case study in copiers[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2011, 55(12): 1196-1205.
- [33] Feitó-Cespón M, Sarache W, Piedra-Jimenez F, et al. Redesign of a sustainable reverse supply chain under uncertainty: A case study[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 151: 206-217.
- [34] Chaabane A, Ramudhin A, Paquet M. Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme[J]. International Journal of Production Economics, 2012, 135(1): 37-49.
- [35] Pishvae M S, Razmi J. Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(8): 3433-3446.



- [36] Subulan K, Taan A S, Baykasolu A. Designing an environmentally conscious tire closed-loop supply chain network with multiple recovery options using interactive fuzzy goal programming[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, 39(9): 2661-2702.
- [37] Govindan K, Paam P, Abtahi A R. A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable reverse logistics network design[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 753-768.
- [38] Dehghanian F, Mansour S. Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2009, 53(10): 559-570.
- [39] Vadenbo C, Guillén-Gosálbez G, Saner D, et al. Multi-objective optimization of waste and resource management in industrial networks—Part II: Model application to the treatment of sewage sludge[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, 89: 41-51.
- [40] Jindal A, Sangwan K S. Multi-objective fuzzy mathematical modelling of closed-loop supply chain considering economical and environmental factors[J]. *Annals of Operations Research*, 2017, 257(1): 95-120.
- [41] Soleimani H. A new sustainable closed-loop supply chain model for mining industry considering fixed-charged transportation: A case study in a travertine[J]. *Resources Policy*, 2018, DOI: 10.1016/J.resourpol.2018.07.006.
- [42] Krikke H, Bloemhof-Ruwaard J, Wassenhove L N V. Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators[J]. *International Journal of Production Research*, 2003, 41(16): 3689-3719.
- [43] Ning X, Qi J Y, Wu C L, et al. Reducing noise pollution by planning construction site layout via a multi-objective optimization model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 222: 218-230.
- [44] 伍星华. 再制造混合物流网络的多周期多目标优化设计[J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(2): 21-25.  
(Wu X H. Optimal design of hybrid remanufacturing logistics network with multi-objective and multi-period[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(2): 21-25.)
- [45] 李伯棠, 赵刚. 基于鲁棒优化的低碳再制造物流网络模型[J]. *山东大学学报: 理学版*, 2017, 52(1): 46-58.  
(Li B T, Zhao G. Model of low carbon remanufacturing logistics network based on robust optimization[J]. *Journal of Shandong University: Natural Science*, 2017 52(1): 46-58.)
- [46] Rezaei S, Kheirkhah A. A comprehensive approach in designing a sustainable closed-loop supply chain network using cross-docking operations[J]. *Computational and Mathematical Organization Theory*, 2018, 24(1): 51-98.
- [47] Garg K, Kannan D, Diabat A, et al. A multi-criteria optimization approach to manage environmental issues in closed loop supply chain network design[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 100: 297-314.
- [48] Reza S R, Nasim N. A novel multi-objective optimization model for integrated problem of green closed loop supply chain network design and quantity discount[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 196: 1549-1565.
- [49] Zohal M, Soleimani H. Developing an ant colony approach for green closed-loop supply chain network design: A case study in gold industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 133: 314-337.
- [50] Pourmohammadi H, Rahimi M, Dessouky M. Sustainable reverse logistics for distribution of industrial waste/byproducts: A joint optimization of operation and environmental costs[J]. *Supply Chain Forum: An International Journal*, 2008, 9(1): 1-17.
- [51] 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[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165: 1598-1619.
- [52] Paksoy T, Bekta T, Özceylan E. Operational and environmental performance measures in a multi-product closed-loop supply chain[J]. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2011, 47(4): 532-546.
- [53] 程发新, 李莉, 潘婷. 碳税政策下多目标再制造物流网络优化[J]. *工业工程与管理*, 2017, 22(5): 135-141.  
(Cheng X F, Li L, Pan T. Multi-objective re-manufacturing logistics network optimization under carbon tax policy[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2017, 22 (5): 135-141.)
- [54] 李莉, 程发新, 程显钦, 等. 基于改进多目标粒子群优化算法的企业再制造物流网络优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(8): 240-250.  
(Li L, Cheng F X, Cheng X Q, et al. Enterprise remanufacturing logistics network optimization based on modified multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(8): 240-250.)
- [55] 严南南, 李明. 基于低碳的报废汽车逆向物流网络选址问题研究[J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2016, 35(5): 180-184.  
(Yan N N, Li M. Location selection for logistics network for recycled scraped motorcar based on low-carbon principle[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Sciences*, 2016, 35(5): 180-184.)
- [56] 曹锋, 郭健全, 刘欣欣. 考虑碳排放的多周期医药逆向物流网络联建研究[J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2017(2): 52-60.  
(Cao F, Guo J Q, Liu X X. A joint construction research for multi-period medicine reverse logistics network with consideration of carbon emissions[J]. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2017(2): 52-60.)
- [57] Nurjanni K P, Carvalho M S, Costa L. Green supply chain design: A mathematical modeling approach based on a multi-objective optimization model[J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 183: 421-432.

- [58] Ramos T R P, Gomes M I, Barbosa-Póvoa A P. Planning a sustainable reverse logistics system: Balancing costs with environmental and social concerns[J]. *Omega*, 2014, 48: 60-74.
- [59] Bortolini M, Galizia F G, Mora C, et al. Bi-objective design of fresh food supply chain networks with reusable and disposable packaging containers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 184: 375-388.
- [60] Accorsi R, Manzini R, Pini C, et al. On the design of closed-loop networks for product life cycle management: Economic, environmental and geography considerations[J]. *Journal of Transport Geography*, 2015, 48: 121-134.
- [61] Diabat A, Abdallah T, Al-Refaie A, et al. Strategic closed-loop facility location problem with carbon market trading[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2013, 60(2): 398-408.
- [62] Govindan K, Jha P C, Garg K. Product recovery optimization in closed-loop supply chain to improve sustainability in manufacturing[J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 54(5): 1463-1486.
- [63] Choudhary A K, Sarkar S, Settur S, et al. A carbon market sensitive optimization model for integrated forward-reverse logistics[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 164: 433-444.
- [64] Minciardi R, Paolucci M, Robba M, et al. Multi-objective optimization of solid waste flows: Environmentally sustainable strategies for municipalities[J]. *Waste Management*, 2008, 28(11): 2202-2212.
- [65] Hao Y, Deng S W. Incorporating flexible capacity in the planning of a multi-product multi-echelon sustainable reverse logistics network under uncertainty[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 198: 285-303.
- [66] Banasik A, Kanellopoulos A, Claassen G D H, et al. Closing loops in agricultural supply chains using multi-objective optimization: A case study of an industrial mushroom supply chain[J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 183: 409-420.
- [67] Yu H, Wei D S. A carbon-constrained stochastic optimization model with augmented multi-criteria scenario-based risk-averse solution for reverse logistics network design under uncertainty[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 164: 1248-1267.
- [68] Jin H Y, Song B D, Mendis G P, et al. A location-allocation model for sustainable NdFeB magnet recovery under uncertainties[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2018, 67(1): 37-40.
- [69] Talaei M, Moghaddam B F, Pishvae 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[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 113: 662-673.
- [70] Devika K, Jafarian A, Nourbakhsh V. Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 235(3): 594-615.
- [71] Nguyen T V, Zhou L, Lin Y. A multi-objective, multi-product and multi-transportation mode sustainable closed-loop supply chain network design[C]. *Proceedings of 2016 International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences (LISS)*. Sydney: IEEE, 2016: 24-27.
- [72] Kannan D, Diabat A, Alrefaei M H, et al. A carbon footprint based reverse logistics network design model[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, 67: 75-79.
- [73] Yu H, Solvang W D. A stochastic programming approach with improved multi-criteria scenario-based solution method for sustainable reverse logistics design of waste electrical and electronic equipment (WEEE)[J]. *Sustainability*, 2016, 8(12): 1331-1358.
- [74] 刘源. 多目标再制造闭环物流网络设计模型[J]. *科技管理研究*, 2009, 29(5): 299-301.  
(Liu Y. Design a multi-objective model for closed-loop remanufacturing logistics network[J]. *Science and Technology Management Research*, 2009, 29(5): 299-301.)
- [75] Amin S H, Zhang G. A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(6): 4165-4176.
- [76] Erkut E, Karagiannidis A, Perkoulidis G, et al. A multicriteria facility location model for municipal solid waste management in North Greece[J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 187(3): 1402-1421.
- [77] Ghayebloo S, Tarokh M J, Venkatadri U, et al. Developing a bi-objective model of the closed-loop supply chain network with green supplier selection and disassembly of products: The impact of parts reliability and product greenness on the recovery network[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2015, 36: 76-86.
- [78] Achillas C, Aidonis D, Vlachokostas C, et al. A multi-objective decision-making model to select waste electrical and electronic equipment transportation media[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 66: 76-84.
- [79] Darbari J D, garwal V A, Yadavalli V S S, et al. A multi-objective fuzzy mathematical approach for sustainable reverse supply chain configuration[J]. *Journal of Transport and Supply Chain Management*, 2017, 11: 267-279.
- [80] Pati R K, Vrat P, Kumar P. A goal programming model for paper recycling system[J]. *Omega*, 2008, 36(3): 405-417.
- [81] 房巧红, 陈功玉. 再制造逆向物流网络的机会约束目标规划模型[J]. *工业工程与管理*, 2010, 15(1): 74-81.  
(Fang Q H, Chen G Y. Chance-constrained goal programming model for remanufacturing reverse logistics network[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2010, 15(1): 74-81.)
- [82] Alperen B, Itir S S. A goal programming model for

- sustainable reverse logistics operations planning and an application[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 201: 1081-1091.
- [83] Edalatpour M A, Al-E-Hashem S M J M, Karimi B, et al. Investigation on a novel sustainable model for waste management in megacities: A case study in Tehran municipality[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 36: 286-301.
- [84] Kapukaya E N, Bal A, Satoglu S I. A bi-objective model for sustainable logistics and operations planning of WEEE recovery[J]. *An International Journal of Optimization and Control: Theories and Applications*, 2019, 9(2): 89-99.
- [85] Seuring S, Müller M. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2008, 16(15): 1699-1710.
- [86] Shokouhyar S, Aalirezai A. Designing a sustainable recovery network for waste from electrical and electronic equipment using a genetic algorithm[J]. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 2017, 16(1): 60-78.
- [87] Darbari J D, Agarwal V, Chaudhary K, et al. Multi-criteria decision approach for a sustainable reverse logistics network under fuzzy environment[C]. *Proceedings of the 2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Dubai: IEEE, 2015: 1339-1346.
- [88] Fathollahi-Fard A M, Hajiaghahi-Keshteli M, Mirjalili S. Multi-objective stochastic closed-loop supply chain network design with social considerations[J]. *Applied Soft Computing*, 2018, 71: 505-525.
- [89] Jin H Y, Song B D, Yih Y, et al. Sustainable value recovery of NdFeB magnets: A multi-objective network design and genetic algorithm[J]. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2018, 6(4): 4767-4775.
- [90] 何波, 杨超, 张华. 废弃物回收的多层逆向物流网络优化设计问题研究[J]. *中国管理科学*, 2007, 15(3): 61-67.  
(He B, Yang C, Zhang H. Optimal design of the multi-echelon reverse logistics network for solid wastes[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2007, 15(3): 61-67.)
- [91] 周向红, 高阳, 任剑, 等. 政府补贴下的再制造逆向物流多目标选址模型及算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(8): 1996-2003.  
(Zhou X H, Gao Y, Ren J, et al. Multi-objective location model and algorithm for considering government subsidy in reverse logistics[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2015, 35(8): 1996-2003.)
- [92] Bing X Y, Bloemhof-Ruwaard J M, Chaabane A, et al. Global reverse supply chain redesign for household plastic waste under the emission trading scheme[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 28-39.
- [93] Zorbakhshnia N, Soleimani H, Goh M, et al. A novel multi-objective model for green forward and reverse logistics network design[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 208: 1304-1316.
- [94] Govindan K, Soleimani H. A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: A journal of cleaner production focus[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142(1): 371-384.
- [95] Jiao Z, Ran L, Zhang Y Z, et al. Data-driven approaches to integrated closed-loop sustainable supply chain design under multi-uncertainties[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 185: 105-127.
- [96] Özceylan E, Demirel N, Çetinkaya C, et al. A closed-loop supply chain network design for automotive industry in Turkey[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 113: 727-745.
- [97] Bing X Y, Bloemhof-Ruwaard J M, Vorst J G A J. Sustainable reverse logistics network design for household plastic waste[J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2014, 26(1/2): 119-142.
- [98] John S T, Sridharan R, Kumar P N R. Multi-period reverse logistics network design with emission cost[J]. *The International Journal of Logistics Management*, 2017, 28(1): 127-149.
- [99] Xiao Z D, Sun J N, Shu W J, et al. Location-allocation problem of reverse logistics for end-of-life vehicles based on the measurement of carbon emissions[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2019, 127: 169-181.
- [100] 周珍, 杨斌, 许波, 等. 政府引导下的报废汽车逆向物流网络优化设计[J]. *现代制造工程*, 2015(12): 113-120.  
(Zhou Z, Yang B, Xu B W, et al. Optimal design of reverse logistics network for the end-of-life automobiles under the guidance of the government[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2015(12): 113-120.)
- [101] 郑卫彦, 孟燕萍. 政府引导下绿色逆向物流网络线性规划模型——以快递包装为例[J]. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 2017, 51(4): 518-525.  
(Zheng W Y, Meng Y P. The linear programming model of the green reverse logistics network under the guidance of the government—Taking express package as an example[J]. *Journal of Central China Normal University: Natural Sciences*, 2017, 51(4): 518-525.)
- [102] Agarwal V, Govindan K, Darbari J D, et al. An optimization model for sustainable solutions towards implementation of reverse logistics under collaborative framework[J]. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2016, 7(4): 480-487.
- [103] Yu H, Solvang W D. A general reverse logistics network design model for product reuse and recycling with environmental considerations[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(9/10/11/12): 2693-2711.
- [104] 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.  
(He B, Yang C, Zhang H, et al. Optimal design of reverse logistics network for solid wastes[J]. *Systems*

- Engineering, 2006, 24(8): 38-41.)
- [105] 何波, 杨超, 杨璐. 废弃物逆向物流网络设计的多目标优化模型[J]. 工业工程与管理, 2007, 12(5): 43-46.  
(He B, Yang C, Yang J. A multi-objective optimization model of reverse logistics for solid wastes[J]. Industrial Engineering and Management, 2007, 12(5): 43-46.)
- [106] Yu H, Solvang W D, Solvang B. A multi-objective mathematical programming for sustainable reverse logistics network design. Part I: Model formulation[J]. WIT Transactions on Engineering Sciences, 2016, 113: 287-295.
- [107] Yu H, Solvang W D. A reverse logistics network design model for sustainable treatment of multi-sourced waste of electrical and electronic equipment (WEEE)[C]. Proceedings of 4th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications. Budapest: IEEE, 2013: 595-600.
- [108] Fonseca M C, García-Sánchez Á, Ortega-Mier M, et al. A stochastic bi-objective location model for strategic reverse logistics[J]. TOP, 2010, 18(1): 158-184.
- [109] Tosarkani B M, Amin S H. An environmental optimization model to configure a hybrid forward and reverse supply chain network under uncertainty[J]. Computers and Chemical Engineering, 2019, 121: 540-555.
- [110] 张群, 卫李蓉. 逆向物流网络设计多目标随机规划模型[J]. 软科学, 2015, 29(10): 120-124.  
(Zhang Q, Wei L R. A multi-objective reverse logistics network design model under stochastic environment[J]. Soft Science, 2015(10): 120-124.)
- [111] Galante G M, Aiello G, Enea M, et al. A multi-objective approach to solid waste management[J]. Waste Management, 2010, 30(8/9): 1720-1728.
- [112] Xu Z T, Elomri A, Pokharel S, et al. Global reverse supply chain design for solid waste recycling under uncertainties and carbon emission constraint[J]. Waste Management, 2017, 64: 358-370.
- [113] Lu Y, Li X, Liang L. Multi-objective optimization of reverse logistics network based on improved particle swarm optimization[C]. Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing: IEEE, 2008: 7476-7480.
- [114] 郭秀萍. 多目标进化算法及其在制造系统中的应用研究[D]. 上海: 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 2007.  
(Guo X P. Multi-objective evolutionary algorithm and its application in manufacturing system[D]. Shanghai: School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, 2007.)
- [115] Samadi A, Mehranfar N, Fard A M F, et al. Heuristic-based metaheuristics to address a sustainable supply chain network design problem[J]. Journal of Industrial and Production Engineering, 2018, 35(2): 102-117.
- [116] Mohamadpour T B, Hassanzadeh A S. A multi-objective model to configure an electronic reverse logistics network and third party selection[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 198: 662-682.
- [117] 王海燕, 张岐山. 考虑负效应的城市废弃物中转站多目标选址模型及算法[J]. 管理工程学报, 2013, 27(1): 135-141.  
(Wang H Y, Zhang Q S. Multi-objective model and algorithm for municipal trash transferring depots location problems by considering undesirable effects[J]. Journal of Industrial Engineering Engineering Management, 2013, 27(1): 135-141.)
- [118] Bigum M K K, Brogaard L K, Christensen T H. Metal recovery from high-grade WEEE: A life cycle assessment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012(207/208): 8-14.
- [119] Rahmani M, Nabizadeh R, Yaghmaeian K, et al. Estimation of waste from computers and mobile phones in Iran[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2014, 87: 21-29.
- [120] Tuzkaya G, Gülsün B, Suel Ö. A methodology for the strategic design of reverse logistics networks and its application in the Turkish white goods industry[J]. International Journal of Production Research, 2011, 49(15): 4543-4571.
- [121] Costi P, Minciardi R, Robba M, et al. An environmentally sustainable decision model for urban solid waste management[J]. Waste Management, 2004, 24(3): 277-295.
- [122] 何波, 杨超, 任鸣鸣. 废弃物处理站选址问题及多目标演化算法求解[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(11): 72-78.  
(He B, Yang C, Ren M M. Undesirable facility location problem using a multi-objective evolutionary algorithm[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2007, 27(11): 72-78.)

## 作者简介

甘俊伟(1987—), 男, 副教授, 博士生, 从事物流与供应链管理研究, E-mail: lyxygjw@163.com;

罗利(1968—), 女, 教授, 博士生导师, 从事服务运作管理研究, E-mail: luolicc@scu.edu.cn;

寇然(1996—), 女, 硕士生, 从事服务运作管理的研究, E-mail: 785400827@qq.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)