

不确定环境下快递包装物逆向物流网络设计^{*}

李姗姗¹, 韩阳洁², 赵英姿², 范志强²

(1. 河南理工大学 财经学院; 2. 河南理工大学 工商管理学院, 河南 焦作 454000)

摘要:【目的】针对快递包装物回收问题建立了包含居民点、回收中心、处理中心、再制造中心与焚烧中心的逆向物流网络。【方法】考虑到快递包装物的回收具有分布范围较广、数量较多且波动较大的特点,采用三角模糊数进行定义,以成本最小化为目标构建了混合整数非线性规划模型,以确定各级设施的数量、位置以及物流分配。【结果】运用可信性理论,通过设置置信水平等参数,对模型的约束条件进行了等价转换,降低了模型的求解复杂度。【结论】实验结果表明,模型能够较为真实地模拟快递包装物逆向物流网络决策过程,是可行的;Lingo 程序能够有效地求解到模型中各级设施布局以及它们之间流向与流量的最优方案。

关键词:不确定性;逆向物流;网络规划;快递包装物

中图分类号: O226; F259.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2022)01-0100-08

随着网络信息技术的创新发展,互联网技术在中国市场上孕育出了电子商务这一新型经济模式,使生产、消费与物流活动都产生了变革,也顺势带动物流与快递行业,使之得到了发展^[1]。随之而来的是快递包装物数量的持续上涨。然而在此背景下,绝大部分快递包装被消费者随意丢弃,回收率极低^[2]。快递包装物的有效回收不但有利于提高资源循环利用率,也有助于减少环境污染,对于中国构建生态文明体系和推动经济社会绿色发展有着重要的意义。

现有关于快递包装物逆向物流网络的研究可分为两类:一类是从定性的角度对回收模式、策略、机制等方面进行分析^[3-6];另一类是从定量的角度,通过构建数学模型进行研究。而定量研究根据运营环境是否确定,又可分为两类:一类是确定性运营环境,此时回收数量、设施数量等参数均为确定性输入参数^[7-10];另一类是不确定运营环境,此时回收数量、回收价格、回收意愿等不能完全事先确定,建模与求解难度较大,决策过程与依据也更为复杂。在不确定环境下的逆向物流网络规划中,Nimra 等人^[11]以电子垃圾为研究对象,认为回收数量服从正态分布,构建了使利润最大化、碳排放最小化的不确定环境下的多目标管理逆向物流网络,张群等人^[12]以废钢回收为背景,视回收数量为随机量,设定多种离散型概率分布情景,设计了企业的逆向物流网络,考虑回收量以及回收质量的不确定性,以物流网络成本以及对环境的影响最小化为目标,建立了多目标随机规划模型。胡悦等人^[13]以汽车零部件为案例,考虑“回收点—回收中心”组成的两级网络,提出充分考虑回收量不确定的设施选址规划模型,利用遗传算法和贪婪算法相结合的混合算法对设施选址进行求解,验证了模型的可行性。许晨路等人^[14]考虑“客户点—回收中心—备选处理中心”组成的 3 级物流网络,构建了鲁棒优化模型,并运用粒子群算法进行了求解。本文主要从定量的角度研究第二类情形。

现有的第二类情形研究文献中,要么假定回收量在一定时期内满足一定的统计规律^[11-12],即概率分布为已知;要么简化了逆向物流网络结构^[13-14],这与快递包装物的回收再利用实际情况均有一定的差距。快递包装物的回收存在居民点分布范围较广和回收数量较多的特点,无法提前预知具体数量,同时受网络促销(如双十一购物节)等活动的影响,回收数量又呈现出波动范围较大的现象,运用已有文献中的正态分布和离散型概率分布都难以真实反映实际情况。有鉴于此,本文运用三角模糊数来表示居民点的回收数量,使之更真实地反映回收数

^{*} 收稿日期:2021-05-10 修回日期:2021-11-05 网络出版时间:2022-02-09 15:00

资助项目:国家自然科学基金(No. 71502050);河南省哲学社会科学规划项目(No. 2018BJJ023);河南省高校人文社会科学研究一般项目(No. 2021-ZZJH-129);河南省软科学研究计划项目(No. 202400410428)

第一作者简介:李姗姗,女,讲师,研究方向为成本管理,E-mail:lss925@hpu.edu.cn;通信作者:韩阳洁,女,E-mail:hanyangjie0129@163.com

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20220209.1123.002.html

量的不确定性,同时构建包括居民点、回收中心、处理中心、再制造中心及焚烧填埋中心的 5 级逆向物流网络,使之更加符合快递包装物回收再利用的渠道途径,以此建立数学模型为快递包装物逆向物流网络优化提供决策支持。

1 模型构建

1.1 问题描述与模型假设

从 5 个层级构建快递包装物逆向物流网络,包括居民点、回收中心、处理中心、再制造中心及焚烧填埋中心,对回收的快递包装物进行挑选、处理后选择再制造和焚烧填埋两种处理方式。消费者将废旧快递包装物自行送往居民点,由专门工作人员将废旧快递包装物从居民点运往回收点,经回收点集中运往处理中心,处理中心对废旧快递包装物进行挑拣、分类等处理后,将可再制造的部分运往再制造中心进行再加工利用,然后通过流通中心再回到消费者手中,将不可再利用的部分运往焚烧填埋中心,按相关规定进行集中处理。

模型相关假设如下:

- 1) 各个居民点的回收量是相互独立的,且可通过三角模糊数表示;
- 2) 已知可供选择的回收中心、处理中心、再制造中心、焚烧填埋中心的地理位置与数量;
- 3) 快递包装回收物只能依次由居民点运往回收中心,由回收中心运往处理中心,由处理中心运往再制造中心或焚烧填埋中心,不能跨级运输。

1.2 参数设置

本文参数设置如下: I 为居民点的集合, $\forall i \in I$; J 表示各备选回收中心的集合, $\forall j \in J$; K 表示各备选处理中心的集合, $\forall k \in K$; L 表示备选再制造中心的集合, $\forall l \in L$; M 表示备选焚烧填埋中心的集合, $\forall m \in M$; r 表示快递包装回收物可再制造的比率,即经处理中心运往再制造中心的比率; $\tilde{d}_i$ 为居民点 i 回收快递包装物的模糊数量; t_{ij} 为居民点 i 运往回收中心 j 的单位运输成本; c_{jk} 为回收中心 j 运往处理中心 k 的单位运输成本; f_j 为回收中心 j 的年固定运营成本; a_{kl} 为处理中心 k 运往再制造中心 l 的单位运输成本; v_k 为处理中心 k 的年固定运营成本; u_l 为再制造中心 l 的年固定运营成本; o_{km} 为处理中心 k 运往焚烧填埋中心 m 的单位运输成本; b_m 为焚烧填埋中心的年固定运营成本; g_j 为回收中心 j 的单位处理成本; h_k 为处理中心 k 的单位处理成本; n_l 为再制造中心 l 的单位再制造成本; e_m 为焚烧填埋中心 m 的单位处理成本; c_{afj} 为回收中心 j 的最大容量; c_{avk} 为处理中心 k 的最大处理能力; c_{aul} 为再制造中心 l 的最大再制造能力; c_{abm} 为焚烧填埋中心 m 的最大容量。

决策变量如下: q_{ij} 为从居民点 i 运往回收中心 j 的快递包装物数量; z_{jk} 为从回收中心 j 运往处理中心 k 的快递包装物数量; w_{kl} 为从处理中心 k 运往再制造中心 l 的快递包装物数量; c_{dl} 为再制造中心回收包装物的数量; x_{km} 为从处理中心 k 运往焚烧填埋中心 m 的快递包装物数量; c_m 为焚烧填埋中心回收包装物的数量; s_j 为 0-1 变量,若选中回收中心 j , $s_j=1$, 否则 $s_j=0$; p_k 为 0-1 变量,若选中处理中心 k , $p_k=1$, 否则 $p_k=0$; d_l 为 0-1 变量,若选中再制造中心 l , $d_l=1$, 否则 $d_l=0$; y_m 为 0-1 变量,若选中焚烧填埋中心 m , $y_m=1$, 否则 $y_m=0$ 。

1.3 模型构建

$$\min C_T = \sum_j f_j s_j + \sum_k v_k p_k + \sum_l u_l d_l + \sum_m b_m y_m + \sum_i \sum_j q_{ij} t_{ij} + \sum_j \sum_k z_{jk} c_{jk} + \sum_k \sum_l a_{kl} w_{kl} + \sum_k \sum_m o_{km} x_{km} + \sum_i \sum_j g_j q_{ij} + \sum_j \sum_k h_k z_{jk} + \sum_k \sum_l n_l w_{kl} + \sum_k \sum_m e_m x_{km} \quad (1)$$

$$\sum_j q_{ij} s_j = \tilde{d}_i, \forall i, \quad (2)$$

$$\sum_i q_{ij} = \sum_k z_{jk}, \forall j, \quad (3)$$

$$\sum_j z_{jk} = \sum_l w_{kl} + \sum_m x_{km}, \forall k, \quad (4)$$

$$\sum_k w_{kl} = c_{dl}, \forall l, \quad (5)$$

$$\sum_k x_{km} = c_m, \forall m, \quad (6)$$

$$\sum_i \tilde{d}_i r = \sum_l c_{dl}, \quad (7)$$

$$\sum_i \tilde{d}_i(1-r) = \sum_m c_{rm}, \quad (8)$$

$$\sum_i q_{ij} \leq c_{afj}, \forall j, \quad (9)$$

$$\sum_j z_{jk} \leq c_{avk} p_k, \forall k, \quad (10)$$

$$\sum_k x_{km} \leq c_{abm} y_m, \forall m, \quad (11)$$

$$\sum_k w_{kl} \leq c_{aul} d_l, \forall l, \quad (12)$$

$$q_{ij} \geq 0; z_{jk} \geq 0; w_{kl} \geq 0; x_{km} \geq 0, \quad (13)$$

$$s_j = 0 \text{ 或 } 1; p_k = 0 \text{ 或 } 1; d_l = 0 \text{ 或 } 1; y_m = 0 \text{ 或 } 1. \quad (14)$$

目标函数(1)为快递包装物回收物流最小总成本,包括回收中心、处理中心、再制造中心、焚烧填埋中心的固定运营成本、处理成本以及各设施之间的运输成本;(2)式表示每个居民点回收的快递包装物都被作业;(3)式表示居民点所有回收的快递包装物都运往回收中心;(4)式表示对处理中心和再制造中心收到的快递包装物数量与回收中心的快递包装物数量进行了流量平衡约束;(5)~(8)式对再制造中心和填埋中心进行了流量平衡约束;(9)~(12)式分别对回收中心、处理中心、再制造中心、焚烧填埋中心进行最大产能约束;(13),(14)式限定了决策变量的取值范围。

1.4 模型优化

由于所构建的模型含有模糊参数,对上述模型直接求解无法求出可行的最优解,造成模型脱离实际,因此无法采取确定性方法对目标函数进行求解,需要对其进行模糊化处理。在已有文献研究的基础上,结合实际问题,引入可信性理论,设置置信水平参数,将所有不确定参数转化为三角模糊数,把原来不确定性问题转化为确定性等价类近似求解。

由于约束条件(2),(7),(8)含有模糊参数,现将模糊约束条件转化为模糊机会约束模型。

$$\text{pos}\left\{\sum_j q_{ij} s_j = \tilde{d}_i\right\} \geq \xi_1, \quad (15)$$

$$\text{pos}\left\{r \sum_i \tilde{d}_i = \sum_l c_{dl}\right\} \geq \xi_2, \quad (16)$$

$$\text{pos}\left\{(1-r) \sum_i \tilde{d}_i = \sum_m c_{rm}\right\} \geq \xi_3. \quad (17)$$

机会约束条件表示得到满足的可能性大小是以置信水平至少保证在 ξ_1, ξ_2, ξ_3 时为前提。

下面介绍机会约束条件的相关引理。

引理 1 设三角模糊函数 $\tilde{A}$ 为 (l_a, m_a, p_a) , 则对给定的置信水平 $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$, 当且仅当 $\mu \geq (1-\epsilon)l_a + \epsilon m_a$, $\mu \leq (1-\epsilon)p_a + \epsilon m_a$ 时, 有 $\text{pos}\{\mu \leq \tilde{A}\} \geq \epsilon$ 。

本文采用 $\tilde{d}_i$ 表示居民点 i 对快递包装物的模糊回收量, r 表示经处理中心可再利用比率, 为了将模糊型函数转化为确定型函数进行求解。

根据引理 1, 可将约束条件(2)作如下转化:

$$\sum_j q_{ij} s_j \geq (1-\xi_1)l_a + \xi_1 m_a, \quad (18)$$

$$\sum_j q_{ij} s_j \leq (1-\xi_1)p_a + \xi_1 m_a. \quad (19)$$

将(7)式作如下转化:

$$\sum_l c_{dl} \geq r[(1-\xi_2)l_a + \xi_2 m_a], \quad (20)$$

$$\sum_l c_{dl} \leq r[(1-\xi_2)p_a + \xi_2 m_a]. \quad (21)$$

将(8)式作如下转化:

$$\sum_m c_{dm} \geq (1-r)[(1-\xi_3)l_a + \xi_3 m_a], \quad (22)$$

$$\sum_m c_{dm} \leq (1-r)[(1-\xi_3)p_a + \xi_3 m_a]. \quad (23)$$

采用上述三角模糊数方法,可将不确定性环境下快递包装物回收网络模型转化为清晰等价形式,即:目标函数为(1)式,约束条件为(3)~(6)式、(9)~(14)式以及(18)~(23)式。

2 实验结果分析

2.1 实验算例

结合实际情况,置信水平越大,决策结果可信度越高,因此本文将分别取 $\zeta_1=\zeta_2=\zeta_3=0.8,0.85,0.9,0.95$ 。根据(18)~(23)式分别计算出 $\tilde{d}_i$ 在不同置信水平下的取值范围,最后采用 Lingo 11.0 进行求解,来对比分析不同置信水平对最终计算结果的影响。

为方便求解和运算,分别对各物流设施进行赋值。在本算例中,已知的居民点 I 有 8 个,备选的回收中心 J 有 6 个,备选处理中心 K 有 4 个,备选的再制造中心 L 有 2 个,备选的焚烧填埋中心 M 有 1 个。居民点产生的快递包装物模糊量以及经模糊处理后在不同置信水平下的各居民点产生的快递包装物数量见表 1,居民点至回收中心的单位运输成本及回收中心单位处理成本、固定成本见表 2,回收中心至处理中心至再制造中心至焚烧填埋中心的单位运输成本及处理中心单位处理成本、固定成本见表 3,再制造中心和焚烧中心单位处理成本、运营成本及各物流节点的最大容量/处理能力见表 4。

表 1 各居民点产生快递包装物的模糊数量及经模糊处理后快递包装物的数量

Tab. 1 The fuzzy number of packages generated by each settlement and the number of express packages after fuzzy processing

居民点 i	$\tilde{d}_i$	$\zeta_1=\zeta_2=\zeta_3$			
		(0.8,0.8,0.8)	(0.85,0.85,0.85)	(0.9,0.9,0.9)	(0.95,0.95,0.95)
$i=1$	(2 200,2 400,2 600)	(2 360,2 440)	(2 370,2 430)	(2 380,2 420)	(2 390,2 410)
$i=2$	(1 900,2 100,2 300)	(2 060,2 140)	(2 070,2 130)	(2 080,2 120)	(2 090,2 110)
$i=3$	(3 000,3 200,3 400)	(3 169,3 240)	(3 170,3 230)	(3 180,3 220)	(3 190,3 210)
$i=4$	(2 400,2 600,2 800)	(2 560,2 640)	(2 570,2 630)	(2 580,2 620)	(2 590,2 610)
$i=5$	(2 800,3 000,3 200)	(2 960,3 040)	(2 970,3 030)	(2 980,3 020)	(2 990,3 010)
$i=6$	(2 900,3 100,3 300)	(3 060,3 140)	(3 070,3 130)	(3 080,3 120)	(3 090,3 110)
$i=7$	(2 600,2 800,3 000)	(2 760,2 840)	(2 770,2 830)	(2 780,2 820)	(2 790,2 810)
$i=8$	(3 100,3 300,3 500)	(3 260,3 340)	(3 270,3 330)	(3 280,3 320)	(3 290,3 310)

表 2 居民点至回收中心的单位运输成本及回收中心单位处理成本、固定成本

Tab. 2 Unit transport cost from residential to recycling center and unit processing cost and fixed cost of recycling center

	t_{ij}								g_j	f_j
	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$		
$j=1$	20	15	18	23	25	16	22	19	30	2 600
$j=2$	16	15	19	12	28	24	26	17	28	2 900
$j=3$	15	17	13	20	23	22	19	21	32	2 400
$j=4$	18	16	19	22	24	14	17	23	26	2 800
$j=5$	21	18	17	19	24	16	20	21	36	3 200
$j=6$	19	17	16	20	23	22	21	18	29	2 700

2.2 算例求解

求解测试的硬件环境为:CPU 型号为 Intel(R) Core(TM) i5-10500,主频 3.10 GHz,内存为 4 GB。整个测试基于 Lingo 11.0 编程。表 5 与表 6 给出了在 $\zeta_1=\zeta_2=\zeta_3=0.85$ 时的求解结果,Lingo 程序采用分支定界算法,经过 1 106 次迭代,得出全局最优解为 3 437 244。图 1 给出了各网络路径上的物流流量分配。显然,本文所建

模型与设计算法能够较真实地模拟快递包装物逆向物流网络中设施布局与最佳运量的决策环境,具有一定的操作可行性。

表 3 各级设施间的单位运输成本及处理中心单位处理成本、固定成本

Tab. 3 Unit cost of transport between different levels of facilities and unit processing cost, fixed cost of processing center

	c_{jk}						a_{kl}		o_{km}	h_k	v_k
	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$	$j=6$	$l=1$	$l=2$			
$k=1$	18	16	20	23	26	25	21	23	24	33	3 200
$k=2$	23	13	22	20	18	16	23	22	22	35	3 400
$k=3$	19	16	18	21	22	20	25	21	20	37	2 800
$k=4$	21	19	17	20	24	16	27	25	26	31	3 000

表 4 再制造中心和焚烧中心单位处理成本、运营成本及各物流节点的最大容量/处理能力

Tab. 4 Unit processing and operating costs of remanufacturing and incineration center and the maximum/processing capacity of each logistics node

	$l/m=1$	$l/m=2$	节点序号	c_{afj}	c_{avk}	c_{aul}	c_{abm}
n_l	36	38	1	3 800	8 800	16 500	15 000
u_l	3 500	3 900	2	4 400	7 500	15 000	
e_m	37		3	4 200	8 000		
b_m	3 500		4	4 600	7 000		
			5	3 300			
			6	4 000			

表 5 居民点和回收中心选址决策

Tab. 5 Location decision of residential area and recycling center

回收中心 j	居民点 i							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	1	0	0	0	1
2	1	0	0	0	0	0	1	0
3	1	1	0	0	1	1	0	0
4	0	0	1	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	0	0	1

表 6 回收中心、处理中心、再制造中心和焚烧填埋中心选址决策

Tab. 6 Location decision of recycling, treatment, temanufacturing center, incineration and landfill center

处理中心 k	回收中心 j						再制造中心 l		焚烧填埋中心 m
	1	2	3	4	5	6	1	2	
1	1	0	0	0	1	1	1	0	0
2	1	0	0	1	0	0	1	0	1
3	0	0	1	0	0	0	0	1	1
4	0	1	1	0	0	0	1	0	0

具体流量分配如下：

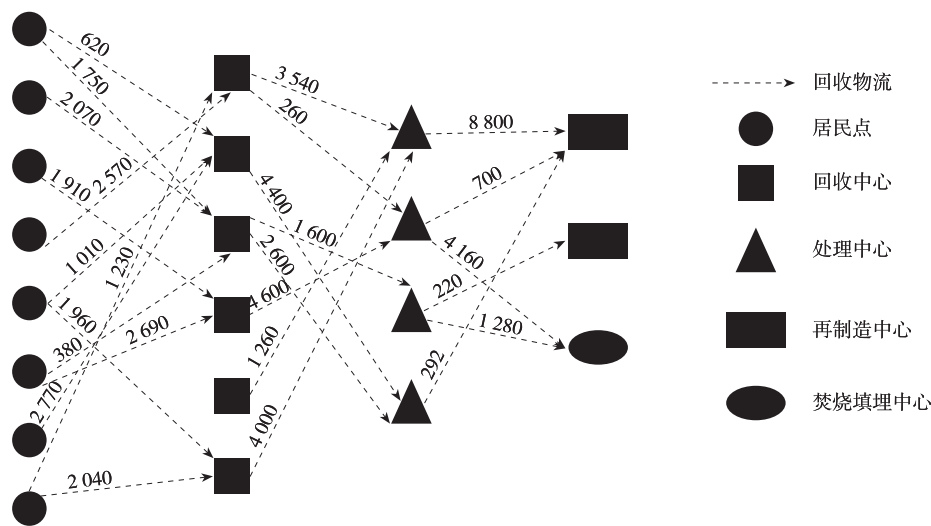


图 1 各网络路径的流量分配

Fig. 1 Traffic allocation for each network path

2.3 敏感性分析

当再制造比率 $r=0.8$, $\zeta_1=\zeta_2=\zeta_3=0.85$ 时,选中 6 个回收中心、4 个处理中心、2 个再制造中心和 1 个焚烧填埋中心,新增回收中心 1 个,居民点 5 到回收中心路径由 3 变成 2,新增 1 条回收中心 1 到处理中心 2 选址、回收中心 5 到处理中心 1 选址、减少回收中心 4 到处理中心 1 的选址,部分物流节点选址及流量分配发生改变。通过上述算例分析,证明了所构建的目标函数在置信水平为 0.85 时有效,可以解决快递包装物回收物流网络各物流节点的选址以及各设施间流量分配问题。

为了分析不同的置信水平和再制造率对整个回收物流网络的影响,对不同再制造率和置信水平下的快递包装物回收情况进行分析,以置信水平 $\zeta_1=\zeta_2=\zeta_3=0.85$ 为前提,再制造中心的再制造比率 r 分别为 0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9 进行求解分析,以 $r=0.8$ 为前提,置信水平分别为 $\zeta_1=\zeta_2=\zeta_3=0.60,0.65,0.70,0.75,0.80,0.85,0.90,0.95$ 带入目标模型中,利用 Lingo 11.0 进行求解,得出模型的总成本与再制造比率及置信水平之间的关系,参数变化时总成本结果见表 7,具体分析如图 2 和图 3 所示。

从图 2 中可以清晰地看出再利用率的变动对总成本的变化影响:置信水平为 0.85 时,在 $r=0.6$ 时,总成本达到最低;当 $r=0.7$,总成本发生较大增长,总成本与 r 的变动成正比,随着 r 的增大总成本越来越大。从图 3 可以看出,随着置信度的增大,快递包装物回收物流网络成本随之增大。由此可见,再制造比率和置信水平对总成本均有影响。

表 7 不同参数值水平下总成本结果

Tab. 7 Total cost results with different parameter values

$\zeta_1=\zeta_2=\zeta_3=0.85$		$r=0.8$	
r	总成本/元	$\zeta_1=\zeta_2=\zeta_3$	总成本/元
0.3	3 261 172	0.60	3 370 624
0.4	3 251 384	0.65	3 383 896
0.5	3 242 960	0.70	3 397 188
0.6	3 235 948	0.75	3 410 540
0.7	3 428 456	0.80	3 423 892
0.8	3 437 244	0.85	3 437 244
0.9	3 447 530	0.90	3 450 596
		0.95	3 463 948

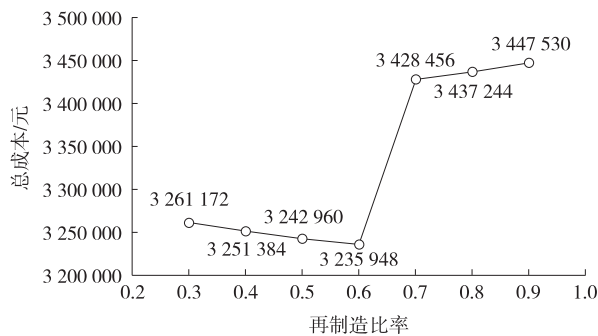


图 2 再制造比率变动下总成本变化情况

Fig. 2 The change of total cost under change of remanufacturing ratio

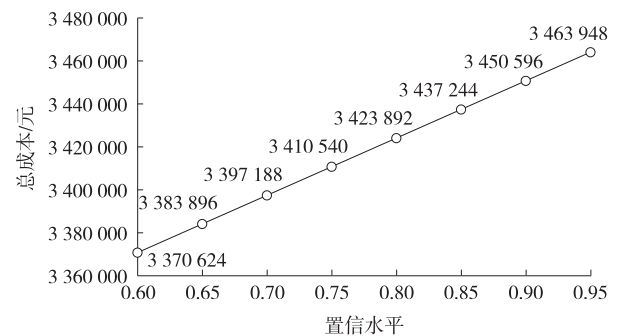


图 3 置信水平变动下总成本的变化情况

Fig. 3 The change of total cost under the change of confidence level

在本文所构建的快递包装物回收网络中,回收中心、处理中心与焚烧填埋中心的选址结果与再制造比率的变动关系不大,但当 r 大于等于0.8时,再制造中心的选址发生变化,需再增加1个再制造中心才能正常运转,但是各物流节点的流量分配变化较大。置信水平的变化对于各物流节点的选址变化不大,但是各物流节点的流量分配随着置信水平的改变发生变化,因此再制造比率或置信水平的变化会影响到整个物流回收网络的选址和流量分配。

3 结语

本文考虑到快递包装物回收数量与网路各级设施数量的不确定性,构建了新的混合整数非线性规划模型,通过引入可信性理论,将不确定参数进行了转化,降低了问题的复杂度。研究表明,快递包装物逆向物流网络总成本随着置信水平的增加呈逐渐上升的趋势,但随着再制造比率的增加,总成本呈现先下降后上升的变化。此外,快递包装物逆向物流网络还会受到其他不确定性因素的影响,如运营风险、回收质量等,这将是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 周建平,刘程军,徐维祥,等. 电子商务背景下快递企业物流网络结构及自组织效应:以中通快递为例[J]. 经济地理, 2021, 41(2):103-112.
ZHOU J P, LIU C J, XU W X, et al. Logistics network structure of express delivery companies and their self-organization effect under the background of E-commerce; taking ZTO Express as an example[J]. Economic Geography, 2021, 41(2):103-112.
- [2] 曹西京,张婕. 包装废弃物回收物流管理的探讨[J]. 包装工程, 2009, 30(5):189-191.
CAO X J, ZHANG J. Discussion on logistics management of packaging waste recycling[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(5):189-191.
- [3] YANG J H, LONG R Y, CHEN H, et al. A comparative analysis of express packaging waste recycling models based on the differential game theory[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2021, 168:105449.
- [4] GUO Y L, LUO G L, HOU G S. Research on the evolution of the express packaging recycling strategy, considering government subsidies and synergy benefits[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(3):1144.
- [5] 汪梓懿,张雪斌,姜大立,等. 基于智慧物流的高校快递包装回收流程再造与优化研[J]. 包装工程, 2018, 39(23):20-24.
WANG Z Y, ZHANG X B, JIANG D F, et al. Research on reengineering and optimization of university express packaging recycling process based on intelligent logistics[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(23):20-24.
- [6] 张迎新. 供应链环境下物流包装物逆向物流运作模式研究[J]. 中国物流与采购, 2011(20):72-73.
ZHANG Y X. Research on operation mode of logistics packaging reverse logistics under supply chain environment[J]. China Logistics & Purchasing, 2011(20):72-73.
- [7] 冯勤超,顾宁生. 逆向物流网络优化设计模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007(S2):321-326.
FENG Q C, GU N S. Optimal design model of reverse logistics network[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007(S2):321-326.

- [8] 徐娟,孙文霞. 可循环快递箱逆向物流网络选址规划[J]. 科学技术与工程,2020,20(14):5870-5874.
XU J, SUN W X. A study on the location planning of reverse logistics network for recyclable express box[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(14): 5870-5874.
- [9] 伍星华,王旭,林云. 废旧产品回收再制造物流网络的优化设计模型[J]. 计算机工程与应用,2010,46(26):22-24.
WU X H, WANG X, LIN Y. Optimal design model of waste product recycling and remanufacturing logistics network[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(26): 22-24.
- [10] SAJAN T J, SRIDHARAN R, RAM K P N. Reverse logistics network design; a case of mobile phones and digital cameras[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(1): 615-631.
- [11] NIMRA S, RABIA K, WAQAS A, et al. Reverse logistics network design of e-waste management under the triple bottom line approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 272: 122662.
- [12] 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. Multi-objective stochastic programming model for reverse logistics network design[J]. Soft Science, 2015, 29(10): 120-124.
- [13] 胡悦,罗亚波,李霞. 基于混合算法的不确定环境下逆向物流网络设计研究[J]. 工业工程与管理,2018,23(1):90-95.
HU Y, LUO Y B, LI X. A hybrid algorithm for reverse logistics network design in uncertain environment[J]. Industrial Engineering and Management, 2018, 23(1): 90-95.
- [14] 许晨路,杨斌,朱小林. 基于鲁棒优化的逆向物流网络设计研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2018,43(6):2266-2275.
XU C L, YANG B, ZHU X L. Research on reverse logistics network design based on robust optimization[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2018, 43(6): 2266-2275.

Operations Research and Cybernetics

Reverse Logistics Network Design of Express Package Under Uncertain Environment

LI Shanshan¹, HAN Yangjie², ZHAO Yingzi², FAN Zhiqiang²

(1. Institute of Finance and Economics, Henan Polytechnic University;

2. School of Business Administration, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454000, China)

Abstract: [Purposes] This research established a reverse logistics network for express packaging, which consists of five levels: residential area, recycling center, treatment center, remanufacturing center and incineration center. [Methods] Because of the characteristics of wide distribution, large quantity and large fluctuation of the recycling of express packages, triangle fuzzy number is used to define the model. In order to determine the number, location and distribution of facilities at all levels, a mixed integer nonlinear programming model was established with the goal of cost minimization. [Findings] By setting confidence level parameters and using credibility theory, the constraint conditions of the model are equivalent transformed, which reduced the complexity of model solution. [Conclusions] The experimental results show that the model can simulate the decision-making process of express packaging reverse logistics network, and it is feasible. The Lingo program can effectively solve the optimal scheme of the layout of facilities at all levels in the model, as well as the flow direction and flow rate between them.

Keywords: uncertainty; reverse logistics; network planning; express package

(责任编辑 许 甲)