绿色包装与循环经济

基于“互联网+TPR”的逆向物流回收网络体系研究

褚东亮[1,2]，范雪[1]，豆祥芬[1]，耿华[1]
（1.北京物资学院 物流学院 北京市物流系统与技术重点实验室，北京 101149；
2.共青科技职业学院，江西 九江 332020）

摘要：目的 为了使快递包装回收更加智能系统化，构建“互联网+TPR”回收新模式，在此基础上搭建北京市快递包装逆向物流回收网络新体系。**方法** 首先对 4 种回收模式进行定性分析，然后构建 4 种回收模式的数学模型，通过对比分析，得出利润最大、回收数量最多的回收模式，最后根据选出的回收模式建立逆向物流回收网络新体系。**结果** 由定性和定量分析的结果可知，“互联网+TPR”回收模式较其他 3 种传统的回收模式更适合于北京市快递包装废弃物的回收。**结论** 以北京市快递包装为研究对象，提出了北京快递包装逆向物流回收新模式，构建了“互联网+TPR”快递包装逆向物流回收网络新体系，解决了中小型企业的投入成本大、利润分配不均、信息流通慢等问题。

关键词：互联网+TPR；逆向物流；回收模式；回收网络体系
中图分类号：TB489 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2023)11-0166-09
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.11.019

Reverse Logistics Recycling Network System Based on "Internet+TPR"

CHU Dong-liang[1,2], *FAN Xue*[1], *DOU Xiang-fen*[1], *GENG Hua*[1]
(1. Beijing Key Laboratory of Logistics System and Technology, School of Logistics, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China; 2. Gongqing Institute of Science and Technology, Jiangxi Jiujiang 332020, China)

ABSTRACT: The work aims to construct a new "Internet +TPR" recycling mode and then build a reverse logistics recycling network system for express packaging in Beijing on this basis to make the recycling of express packaging more intelligent. First, a qualitative analysis of the four recycling modes was first conducted, and a mathematical model of the four recycling modes was constructed. Then, through comparative analysis, the most profitable recycling mode with the largest recycling volume was identified. Finally, a reverse logistics recovery network system was established according to the recycling mode selected. The results of qualitative and quantitative analysis showed that the "Internet + TPR" recycling mode was more suitable for the recycling of express packaging waste in Beijing than the other three traditional recycling modes. With express packaging of Beijing as a research object, the study puts forward a new reverse logistics recycling mode of express packaging in Beijing, constructs a new "Internet +TPR" express packaging reverse logistics recovery network system, and solves the problems of large input cost, uneven profit distribution and slow information circulation of small and medium-sized enterprises.

KEY WORDS: Internet + TPR; reverse logistics; recycling mode; recycling network system

收稿日期：2022−10−08
基金项目：国家自然科学基金（71801016）；北京市社会科学基金（20JCC092&20JCC006）
作者简介：褚东亮（1984—），男，博士，副教授，主要研究方向为绿色物流、物流与供应链管理。

随着快递行业的蓬勃发展，我国已成为世界第二包装大国，包装市场的生产规模已位居全球第一。快递行业为我国国民经济总量和社会就业方面作出了重大的贡献，但是快递包装回收普遍面临着回收成本高、回收效率低、回收渠道少等问题，大量的生产和消费使得包装废弃物的“去向”引起了政府和越来越多企业的关注。于是，快递包装逆向物流回收网络体系的有效构建便成为了当前研究的热点。

据国家邮政局统计，2021 年全国快递业务量达到 1 085 亿件，同年北京市快递业务量累计完成 22.1 亿件。北京市是我国的首都，更是快递业较发达的城市之一，我国快递业平均每年要消耗 900 余万 t 的纸箱废弃物、180 余万 t 的塑料废弃物，每年快递业都能产出这么多的快递废弃物，但是整体回收率却不足 20%，其中 99%的塑料包装都不能被回收[1]。近年来，包装废弃物的快速增长已对国家生态环境造成了严重的负面影响，使包装废弃物成为当前国家环境污染的主要源头之一[2]。若想使国家的生态环境不被巨量的快递包装破坏，唯一的选择就是构建有效的包装废弃物逆向物流回收网络体系，合理应用回收模式。

目前，国内外相关研究的文献可以分为下面 3 个方面。

一是基于逆向物流传统回收模式的研究。倪明等[3]建立了国家建立回收处理中心、制造商联盟回收处理中心和制造商自行建立回收处理中心等 3 种模式对废弃的电子产品进行回收的数学模型，然后进行仿真求出整体回收利润最高的回收处理中心模式。朱凌云等[4]基于模糊综合评价的方法研究以上汽集团的废旧动力电池为研究对象建立了指标体系，从这 3 种逆向物流回收模式中选择一种对上汽集团最优的回收模式，并建立了废旧动力电池的逆向物流回收网络。Pazoki 等[5]通过设计发现生产商自营回收能提高物品的回收率，增加再制造物品的数量以及改善环境质量。江丽娜[6]以西安市为研究对象选择逆向物流回收模式，首先结合区域特征对生产商自营回收、生产商联合回收和第三方回收这 3 种传统回收模式进行了对比分析，然后再建立了数学模型去从客观上计算出利润最高的回收模式，最后应用到西安市包装废弃物的回收中。Leclerc 等[7]选择制造商作为回收电子垃圾的主体，兼顾整个过程中参与者的利益和影响网络设计与实施的因素，提出有待进一步研究的问题。

二是基于“互联网+”回收模式的研究。魏洁[8]研究了利益主体和非利益主体主导的“互联网+”回收模式，在此基础上总结出了 4 点“互联网+”回收模式的构建对策。安静宙[9]以“互联网+”废旧手机回收模式的影响因素为研究对象，在系统动力学模型中，对比了该模式与传统回收模式的回收价格、信息相关性以及物流费用对回收量的影响，从而提出改进回收效率的建议。郭燕[10]提出了在旧衣物回收领域以“互联网+回收”渠道模式创新研究，通过分析该商业模式、微信公众平台实施效果以及对社会的效益，为开展旧衣物“互联网+回收”工作提供可借鉴的经验。许民利等[11]研究了在“互联网+”废旧电子电器产品回收新模式中回收商和传统回收模式中流动小贩的竞争与合作的关系。在后期又对“互联网+”回收中存在的问题提出了合理的建议。

三是基于逆向物流回收网络体系的研究。任鸣鸣等[12]运用模糊综合评价法建立了指标体系，从企业的角度上分析了回收模式的优缺点，最后又用了实验进行了仿真。张群等[13]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回收网络。Bottani 等[14]以最小成本为目标函数，得到全网的设施节点数和路径规划方案，采用生命周期评价的方法分析全网的环境效益。Safdar 等[15]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。刘子文[16]研究了电动汽车动力电池逆向物流回收网络模型建模与优化对未来规模化废旧电池回收的实践处理提供理论建议。李姗姗等[17]针对快递包装回收问题建立了逆向物流回收网络，该网络由三角模糊数定义，建立了以成本最小为目标的混合整数非线性规划模型，通过 LINGO 程序求解出最优方案。

综上所述，已有很多学者从不同的角度去分析生产商自营回收、生产商联合回收和第三方回收这 3 种传统的回收模式。根据逆向物流的不断发展，“互联网+回收”在各个行业的应用越来越广泛，可研究快递包装回收模式中研究“互联网 + 回收”的学者仍然较少，特别是应用到北京市快递包装的逆向物流回收网络的极其缺乏。因此，本文以北京市快递包装作为研究对象，提出基于“互联网+TPR”快递包装逆向物流回收模式研究，通过对比分析 4 种回收模式利润模型，选择最优的回收模式，构建北京快递包装逆向物流回收网络体系。

1　构建快递包装逆向物流回收新模式

在快递包装回收网络中，包装生产商选择的回收模式将直接会影响自身的收益问题。本文将以北京市为研究对象，对生产商自营回收模式、生产商联合回收模式、第三方企业回收模式以及“互联网+Third Party Recycling”（简称“互联网+TPR”）回收模式进行对比分析，选择出最适合北京市的快递回收模式[18]。

1.1　生产商自营回收模式

生产商自营回收模式指由生产商负责快递包装的制造、回收再利用和废物处置等物流活动，如图 1 所示。由包装生产商自行设立独立的回收中心来回收消费者使用后的快递包装，然后将这些包装在回收中心分类，能直接使用和二次加工后能使用的再次销售给电商

平台或者快递企业循环利用，不能使用的可降解塑料包装和纸箱包装直接无害化处理，不可降解的塑料包装经过原料化、颗粒化等技术将其再生或热回收。该模式对中小型企业而言，成本投入过高、风险过大[19]。

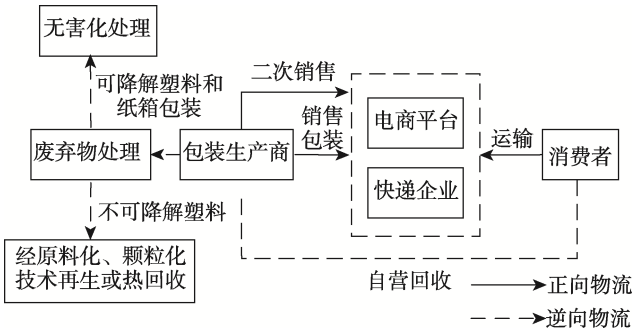

图 1　生产商自营回收模式

Fig.1 Producer-owned recycling mode

1.2　生产商联盟回收模式

生产商联盟回收模式是指经包装生产商考量后加入联盟共同规划快递包装废弃物回收网络，对包装废弃物进行回收。如图 2 所示，由包装生产商联盟组织来回收使用后的快递包装，将可使用的包装分给各个包装生产商，再由各个生产商二次销售给电商平台和快递企业。该模式对中小型企业更加友好了，但是在合作过程中，生产商会因为合作成果的分配以及管理等发生争议，不利于生产商之间的共处[20]。

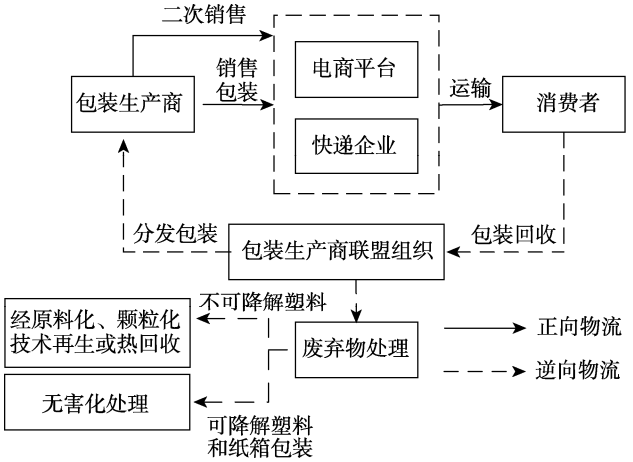

图 2　生产商联盟回收模式

Fig.2 Producer alliance recycling mode

1.3　第三方企业回收模式

第三方企业回收模式指包装生产商、电商平台和快递公司都向第三方公司支付一定的回收费用，由第三方企业来主导回收，责任也都由其独自承担。如图 3 所示，第三方企业将回收的包装进行分类，将可直接利用的包装运到电商企业和快递企业，需要二次加工的运送给包装生产商进行加工后销售。该模式解决了生产商投入成本高、利润分配不均的矛盾，但是包装生产商、电商平台和快递公司不能实时了解回收的状态，信息流通过慢[21]。

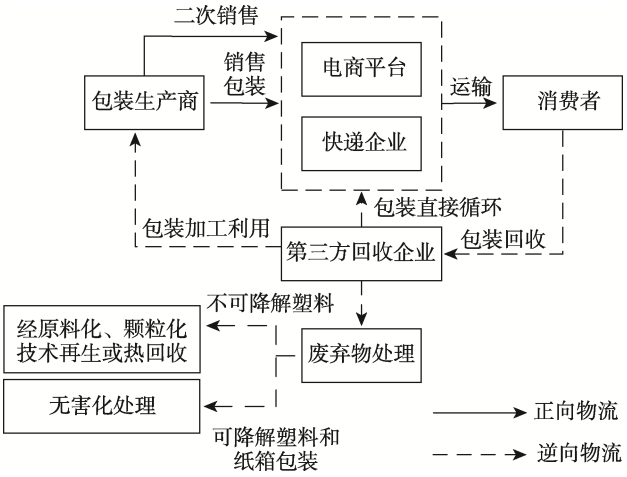

图 3　第三方企业回收模式

Fig.3 Third-party corporate recycling mode

1.4　“互联网+TPR”回收模式

“互联网+TPR”回收模式是在第三方企业回收的基础上添加了一个“互联网+”的元素。第三方回收企业主导，快递企业、电商企业、包装生产商多方配合，利用互联网交易平台的大数据确定消费者的包装数量和地理位置，通过对逆向物流的合理规划，降低回收的成本。如图 4 所示，回收企业需要搭建互联网回收平台，并开发专用的 APP，消费者通过 APP 下单，由“互联网+TPR”企业回收，将可直接利用的直接运到电商企业、快递企业，需要二次加工的运送给包装生产商进行加工后销售。消费者、快递企业、包装生产商、“互联网+TPR”回收企业都能通过 APP 实时地了解到快递包装回收的状态，该模式不仅解决了中小型企业投入成本过大、利润分配不均匀、信息流通过

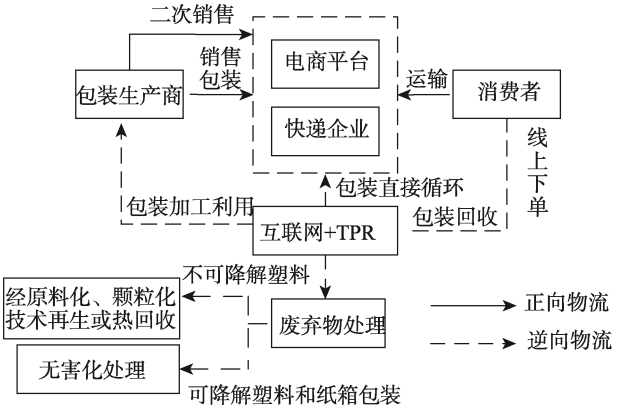

图 4　“互联网+TPR”回收模式

Fig.4 "Internet + TPR" recycling mode

慢的问题，而且可以通过“互联网+”平台对消费者进行激励，调动消费者回收的积极性[22]。

2　模型分析

2.1　快递包装废弃物回收模式比较

目前，我国快递包装废弃物回收模式主要有生产商自营回收模式、生产商联合回收模式、第三方企业回收模式以及“互联网+TPR”回收模式。表 1 对这 4 种回收模式进行了对比分析[23]。

表 1　4 种回收模式的对比
Tab.1 Comparison of four recycling modes

指标	生产商自营回收	生产商联盟回收	第三方企业回收	互联网 + TPR
投资成本	A+	A	C	B
盈利大小	C	B	B	A
回收规模	C	B	A	A
专业能力	B	B	A+	A+
创新能力	C	B	A	A
回收处理能力	B	B	A	A
信息安全性	A++	B	B	A
信息反馈速度	A	C	C	A++
运作效率	A	C	B	A+

注：A++代表最高，A+代表较高，A 代表高，B 代表一般，C 代表低。

根据表 1 所示，“互联网+TPR”为主体的回收模式与其他 3 种回收模式相比，分析的 9 种指标中 7 种都优于其他 3 种回收模式的。因此，“互联网+TPR”回收更适合于北京市快递包装废弃物的回收方式。仅采用定性方法选择回收方式说服力较差[4]，仍需要进一步深入研究。

2.2　建立快递包装废弃物回收模式的模型

分别建立生产商自营回收、生产商联盟回收、第三方企业回收和“互联网+TPR”回收模式的数学模型。这 4 种回收模式中必然存在着诸多的影响因素，本文也不可能考虑到所有影响因素的影响。所以为了简化模型、方便建模进行比较而作出以下基本假设。

假设 1：在每种快递包装逆向物流回收模式中，所有参加的主体均是独立的决策者，预定的目标均为实现最大化的利润。

假设 2：在 4 种回收模式中，快递包装废弃物的回收价格、单位处理成本和二次销售的价格都是相同的。

假设 3：在考虑整个网络的回收成本时，主要加入固定成本、处理成本和运输成本，忽略“互联网+TPR”回收模式中的线上网络维护费用。据 Savaskan 等[24]研究，包装回收主体投入的努力越多，其固定投入越高，可将其固定投入表示为 $C_f=KL^2$。

假设 4：借用代应[25]的假设，将该假设应用到快递包装物的回收模式中，回收数量主要受回收价格及回收便利性的影响，也与人们的环保回收意识有紧密关联。通过江丽娜[6]的假设，当人们对环保回收意识的认知度提高，在不收取回收费用的前提下，将主动送回回收处的快递包装废弃物的数量设为 Q_0，即得：$Q=Q_0+aP_1+\beta L$（Q 为回收包装物数量，$\alpha>0$，$\beta>0$）。模型的参数及其含义如表 2 所示。

表 2　模型参数及其含义
Tab.2 Model parameters and their meanings

参数	含义
C_f	固定投入成本
L	快递包装废弃物回收主体的努力程度
K	常数
a	人们对于回收价格的敏感系数
β	人们对回收主体努力程度的敏感系数
P_1	单个快递包装废弃物的回收价格
P_2	联盟组织卖给包装生产商的单价
P_r	单个快递包装废弃物二次销售的价格
H	政府根据回收数量给予的机制补贴
C_1	单个快递包装废弃物的处理成本
C_2	单个快递包装运输成本
Q_1	包装生产商为主体回收包装的数量
Q_2	包装生产商联盟组织为主体回收包装的数量
Q_3	第三方回收企业为主体回收包装的数量
Q_4	“互联网+TPR”回收模式下，第三方企业为主体回收包装的数量
W_1	包装生产商的利润
W_{21}	包装生产商联盟的回收模式下，包装生产商的利润
W_{22}	包装生产商联盟的利润
W_t	包装生产商联盟回收模式的总利润
W_3	第三方回收企业的利润
W_4	“互联网+TPR”回收模式下，第三方回收企业的利润

2.2.1　生产商自营回收模型

包装生产商自营回收是以生产商为主体建立的逆向物流回收模式，该模式下包装生产商的回收利润来源是快递包装二次销售的金额和政府的补贴，最终的利润函数为：

$$W_1=(P_r+H-P_1-C_1-C_2)\times Q_1-C_f=(P_r+H-P_1-C_1-C_2)(Q_0+\alpha P_1+\beta L)-KL^2 \tag{1}$$

对式（1）中的 P_1 和 L 求导得：

$$\frac{\partial W_1}{\partial P_1}=-(Q_0+\alpha P_1+\beta L)+\alpha(P_r+H-P_1-C_1-C_2)=0$$
$$\frac{\partial W_1}{\partial L}=\beta(P_r+H-P_1-C_1-C_2)-2KL=0 \tag{2}$$

根据式（2）联立可以求出：

$$P_1=\frac{(2\alpha K-\beta^2)(P_r+H-C_1-C_2)-2KQ_0}{4\alpha K-\beta^2}$$
$$L=\frac{\beta[Q_0+\alpha(P_r+H-C_1-C_2)]}{4\alpha K-\beta^2} \tag{3}$$

将式（3）代入式（1）中整理可得：

$$W_1=\frac{K[Q_0+\alpha(P_r+H-C_1-C_2)]^2}{4\alpha K-\beta^2}$$
$$Q_1=\frac{2K\alpha[Q_0+\alpha(P_r+H-C_1-C_2)]}{4\alpha K-\beta^2} \tag{4}$$

2.2.2 生产商联盟回收模型

包装生产商联盟回收是单个的包装生产商没有能力或者没有必要建立单独的回收处理中心的情况下，生产商联合成立生产商联盟组织，合作建立回收处理中心来共同回收处理快递包装废弃物[26]。可以是 2 个或者多个企业参加，他们都属于独立的主体。这种回收模式依靠生产商联盟作为主要的回收来源，所以在建模时将生产商联盟的利润也考虑在内，则生产商联盟的利润以及包装生产商的利润函数如式（5）、式（6）所示。

$$W_{21}=(P_r+H-P_1-C_1-C_2)Q_2-C_f=$$
$$(P_r+H-P_1-C_1-C_2)(Q_0+\alpha P_1+\beta L)-KL^2 \tag{5}$$

$$W_{22}=(P_2-P_1)Q_2-C_f=$$
$$(P_2-P_1)(Q_0+\alpha P_1+\beta L)-KL^2 \tag{6}$$

$$W_t=W_{21}+W_{22} \tag{7}$$

对式（6）中的 P_1 和 L 求导得：

$$\frac{\partial W_{22}}{\partial P_1}=-(Q_0+\alpha P_1+\beta L)+\alpha(P_2-P_1)=0$$
$$\frac{\partial W_{22}}{\partial L}=\beta(P_2-P_1)-2KL=0 \tag{8}$$

根据式（8）联立可以求出：

$$P_1=\frac{(2\alpha K-\beta^2)P_2-2KQ_0}{4\alpha K-\beta^2}$$
$$L=\frac{\beta(\alpha P_2+Q_0)}{4\alpha K-\beta^2} \tag{9}$$

将式（9）代入式（5）中可得：

$$W_{21}=[2K\alpha Q_0(P_r+H-P_2-C_1-C_2)+$$
$$2\alpha^2KP_2(P_r+H-P_2-C_1-C_2)]/4\alpha K-\beta^2 \tag{10}$$

对式（10）中的 P_2 求导，同上整理可得：

$$P_2=\frac{\alpha(P_r+H-C_1-C_2)-Q_0}{2\alpha} \tag{11}$$

将式（11）代入式（9）中可得：

$$P_1=[(2\alpha^2K-\alpha\beta^2)(P_r+H-C_1-C_2)+$$
$$(\beta^2-6\alpha K)Q_0]/[2(4\alpha K-\beta^2)\alpha] \tag{12}$$
$$L=\frac{\beta[Q_0+\alpha(P_r+H-C_1-C_2)]}{8\alpha K-2\beta^2}$$

将式（11）、式（12）代入式（5）、式（6）、式（7）中整理可得：

$$W_{21}=\frac{K[Q_0+\alpha(P_r+H-C_1-C_2)]^2}{8\alpha K-2\beta^2}$$
$$W_{22}=\frac{K[Q_0+\alpha(P_r+H-C_1-C_2)]^2}{16\alpha K-4\beta^2}$$
$$W_t=W_{21}+W_{22}=\frac{K\left[Q_0+\alpha(P_r+H-C_1-C_2)\right]^2}{8\alpha K-2\beta^2}+$$
$$\frac{K\left[Q_0+\alpha(P_r+H-C_1-C_2)\right]^2}{16\alpha K-4\beta^2}=$$
$$\frac{3K\left[Q_0+\alpha(P_r+H-C_1-C_2)\right]^2}{16\alpha K-4\beta^2} \tag{13}$$
$$Q_2=\frac{K\alpha[Q_0+\alpha(P_r+H-C_1-C_2)]}{4\alpha K-\beta^2}$$

2.2.3 第三方企业回收模型

以第三方企业为主体的回收模式中，生产商既可参与回收，也可不参与到快递包装废弃物的回收流程中，直接将快递包装废弃物交付给专业的第三方回收企业。在这种模式下，回收企业可以利用其已有的回收网络提供回收服务。因为第三方回收企业已有现存的回收网络，所以再加建设符合快递包装废弃物回收的网络投入的固定成本要比新建回收网络低。因此，可假设其回收过程中的固定投资成本为新建回收网络的 λ 倍[27]。第三方企业回收的利润函数为：

$$W_3=(P_r+H-P_1-C_1-C_2)Q_3-\lambda C_f=$$
$$(P_r+H-P_1-C_1-C_2)(Q_0+\alpha P_1+\beta L)-\lambda KL^2 \tag{14}$$
$$(0<\lambda<1)$$

对式（14）中的 P_1 和 L 求导得：

$$\frac{\partial W_3}{\partial P_1}=-(Q_0+\alpha P_1+\beta L)+$$
$$\alpha(P_r+H-P_1-C_1-C_2)=0 \tag{15}$$
$$\frac{\partial W_3}{\partial L}=\beta(P_r+H-P_1-C_1-C_2)-2\lambda KL$$

根据式（15）联立可以求出：

$$P_1=\frac{(2\alpha K\lambda-\beta^2)(P_r+H-C_1-C_2)-2\lambda KQ_0}{4\alpha K\lambda-\beta^2}$$
$$L=\frac{\beta[Q_0+\alpha(P_r+H-C_1-C_2)]}{4\alpha K\lambda-\beta^2} \tag{16}$$

将式（16）代入式（14）中可得：

$$W_3=\frac{K\lambda[Q_0+\alpha(P_r+H-C_1-C_2)]^2}{4\alpha K\lambda-\beta^2}$$
$$Q_3=\frac{2K\alpha\lambda[Q_0+\alpha(P_r+H-C_1-C_2)]}{4\alpha K\lambda-\beta^2} \tag{17}$$

2.2.4 “互联网+TPR”回收模型

“互联网+TPR”回收是由专业的回收企业为主，快递企业、电商平台、包装生产商为辅的一种逆向物流回收模式。“互联网+TPR”回收建立在第三方企业回收的基础之上，由于添加了线上平台，可以利用互

联网交易平台上的大数据确定消费者的包装数量和地理位置。通过对逆向物流的合理规划，降低运输的成本，则该回收模式的运输成本要比传统的运输成本低，故假设其回收过程中的运输成本为传统运输成本的 μ 倍。“互联网+TPR”回收的利润函数为：

$$W_4=(P_r+H-P_1-C_1-\mu C_2)Q_4-\lambda C_f=(P_r+H-P_1-C_1-\mu C_2)(Q_0+\alpha P_1+\beta L)-\lambda KL^2 \quad (18)$$

$0<\lambda<1$，$0<\mu<1$

对式（18）中的 P_1 和 L 求导得：

$$\frac{\partial W_4}{\partial P_1}=-(Q_0+\alpha P_1+\beta L)+\alpha(P_r+H-P_1-C_1-\mu C_2)$$
$$\frac{\partial W_4}{\partial L}=\beta(P_r+H-P_1-C_1-\mu C_2)-2\lambda KL \quad (19)$$

根据式（19）联立可以求出：

$$P_1=\frac{(2\alpha K\lambda-\beta^2)(P_r+H-C_1-\mu C_2)-2\lambda KQ_0}{4\alpha K\lambda-\beta^2}$$
$$L=\frac{\beta[Q_0+\alpha(P_r+H-C_1-\mu C_2)]}{4\alpha K\lambda-\beta^2} \quad (20)$$

将式（20）代入式（18）中可得：

$$W_4=\frac{K\lambda[Q_0+\alpha(P_r+H-C_1-\mu C_2)]^2}{4\alpha K\lambda-\beta^2}$$
$$Q_4=\frac{2K\alpha\lambda[Q_0+\alpha(P_r+H-C_1-\mu C_2)]}{4\alpha K\lambda-\beta^2} \quad (21)$$

2.2.5　逆向物流回收模式的结果分析

令 $Q_0+\alpha(P_r+H-C_1-C_2)=A$、$Q_0+\alpha(P_r+H-C_1-\mu C_2)=B$ 可得出 4 种回收模式的利润和回收数量的简化结果，如表 3 所示。

表 3　4 种回收模式的简化结果

Tab.3 Simplified results for four recycling modes

模式	利润	回收数量
生产商自营回收	$W_1=\frac{KA^2}{4\alpha K-\beta^2}$	$Q_1=\frac{2\alpha KA}{4\alpha K-\beta^2}$
生产商联盟回收	$W_t=\frac{3KA^2}{4(4\alpha K-\beta^2)}$	$Q_2=\frac{\alpha KA}{4\alpha K-\beta^2}$
第三方企业回收	$W_3=\frac{K\lambda A^2}{4\alpha\lambda K-\beta^2}$	$Q_3=\frac{2\alpha K\lambda A}{4\alpha\lambda K-\beta^2}$
“互联网 + TPR”回收	$W_4=\frac{K\lambda B^2}{4\alpha\lambda K-\beta^2}$	$Q_4=\frac{2\alpha K\lambda B}{4\alpha\lambda K-\beta^2}$

因为 $0<\lambda<1$，$0<\mu<1$，所以 $A<B$，即：

$$\frac{3KA^2}{4(4\alpha K-\beta^2)}<\frac{KA^2}{4\alpha K-\beta^2}<\frac{K\lambda A^2}{4\alpha\lambda K-\beta^2}<\frac{K\lambda B^2}{4\alpha\lambda K-\beta^2} \quad (22)$$

据式（22）可知，“互联网 + TPR”回收模式获取的利润最大，生产商联盟回收模式获取的利润最差。

据式（23）可知，“互联网 + TPR”回收模式快递包装废物回收数量最多，生产商联盟回收模式回收数量最少。

$$\frac{\alpha KA}{4\alpha K-\beta^2}<\frac{2\alpha KA}{4\alpha K-\beta^2}<\frac{2\alpha K\lambda A}{4\alpha\lambda K-\beta^2}<\frac{2\alpha K\lambda B}{4\alpha\lambda K-\beta^2} \quad (23)$$

综上所述，不管是回收主体的利润方面还是快递包装废物回收数量方面，只要有政府的支持和合适的政策约束，“互联网+TPR”回收模式都优于其他 3 种回收模式。

3　算例分析

为了更好地验证、总结上述结论，本文对上述模型进行数值算例验证。假设北京市在法律法规的约束下，必须对本市产生的快递包装废弃物进行回收处理，通过前文的分析，北京市将面临着多种回收处理模式。现假设 Q_0=1 000，α=10，β=5，K=3，P_r=1，H=0.4，C_1=0.05，C_2=0.1，λ=0.6，μ=0.3，将数据代入表 3 计算得到 4 种回收模式的利润和回收数量，如表 4 所示。

表 4　4 种回收模式的回收利润和回收数量

Tab.4 Recycling margins and recycling volumes for four recycling modes

模式	利润/元	回收数量/件
生产商自营回收	32 373.355 26	639.473 68
生产商联盟回收	24 280.016	319.736 84
第三方企业回收	39 261.303	775.531 91
“互联网 + TPR”回收	39 315.609	776.068 09

从表 4 计算结果可以看出，不管是在回收利润方面还是回收数量方面，生产商联盟回收模式都是最低的，而“互联网+TPR”回收模式相比之下获取的回收利润和回收数量都是最多的。从图 5 中的数据折线走向可以更加清楚地看出 4 种回收模式的回收利润和回收数量情况。其中第三方企业回收模式和“互联网+TPR”回收模式的利润和数量相差不大的主要原因是假设中的主动送回回收处的快递包装废弃物的数量 Q_0 是相同的，但是实际情况中，“互联网+TPR”回收模式回收相比第三方企业回收模式更便捷、更高效、更系统化，Q_0 肯定要远多于第三方回收模式的。

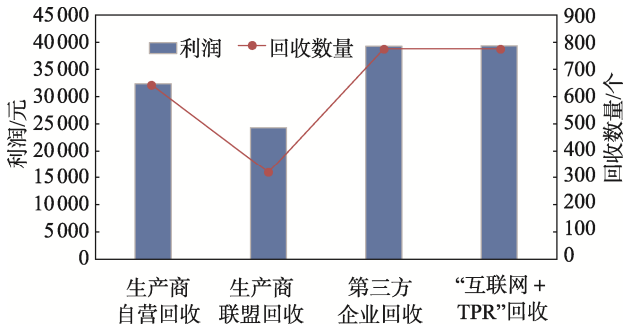

图 5　4 种回收模式的回收利润和回收数量

Fig.5 Recycling margins and recycling volumes for four recycling modes

因此在现实生活中“互联网+TPR”回收模式回收的利润和数量是远大于第三方企业回收模式的。

综上所述，不管是数学模型求解的对比结果还是算例分析结果，只要有政府的支持和合适的政策约束，“互联网+TPR”回收模式都更有优势。因此下文则以“互联网+TPR”回收模式为主体构建北京市快递包装逆向物流回收网络体系。

在政府影响下，以“互联网+TPR”回收模式为主体的北京市快递包装废弃物回收网络体系与传统的回收网络体系不同，“互联网+TPR”回收模式添加了近几年兴起的“互联网+”元素，增加了一个线上平台（微信公众号或者线上 APP），如图 6 所示。消费者在电商平台下单时不仅要支付商品的费用还要支付包装的押金，消费者签收完商品后可将快递包装进行回收，北京市消费者可分为 2 种类型，一种是可累计包装的、一种是不可累计的；可累计的消费者可通过线上平台（微信公众号或者线上 APP）预约专业人员上门回收，专业人员将纸箱包装和塑料包装的信息上传到线上平台，并将包装运到回收站点；不可累计的消费者可将纸箱包装和塑料包装送到附近快递网点或者附近的回收站点，然后由快递员将回收的纸箱包装和塑料包装的信息上传到线上平台。无破损的包装本网点先自行循环利用，多余和破损的包装运输到附近回收站点或者“互联网+”回收企业。所有回收站点的快递包装收集到一定数量后，运输到“互联网+”回收企业。“互联网+”回收企业在企业内部对这些包装进行质量检测，将达标的、无破损的包装再次循环给快递企业、电商平台使用；需要二次加工的运输给包装生产商，由包装生产商经过再制造的流程，制造成新产品送入市场；将无回收价值的包装送往废弃物处置点，可降解塑料包装和废纸箱包装直接无害化处理，不可降解的塑料包装经过原料化、颗粒化等技术将其再生或热回收[28-29]。确定消费者成功参与包装回收后，电商平台将收取的包装押金退回并给予奖励，“互联网+”回收平台也可以对参与度较高的消费者给予一定的奖励激励。在这个线上平台中，政府、包装生产商、快递企业、电商平台、“互联网+”回收企业、消费者共同参与其中。政府可以清楚地知道哪些企业积极响应了政府的号召，哪些企业没有参与进去。对积极响应号召的企业应给予资金补助、信誉奖励、减免税收等奖励，相反对那些没有参与回收的企业也要给予一定程度的惩罚，以此来约束相关企业积极参与到快递包装逆向物流回收流程中[30]。但是仅靠企业参与回收还是远远不够的，逆向物流供应链的源头是消费者，消费者若不参与，逆向物流将没有实施的意义，因此政府应加大力度宣传教育，并用法律法规约束消费者和企业。

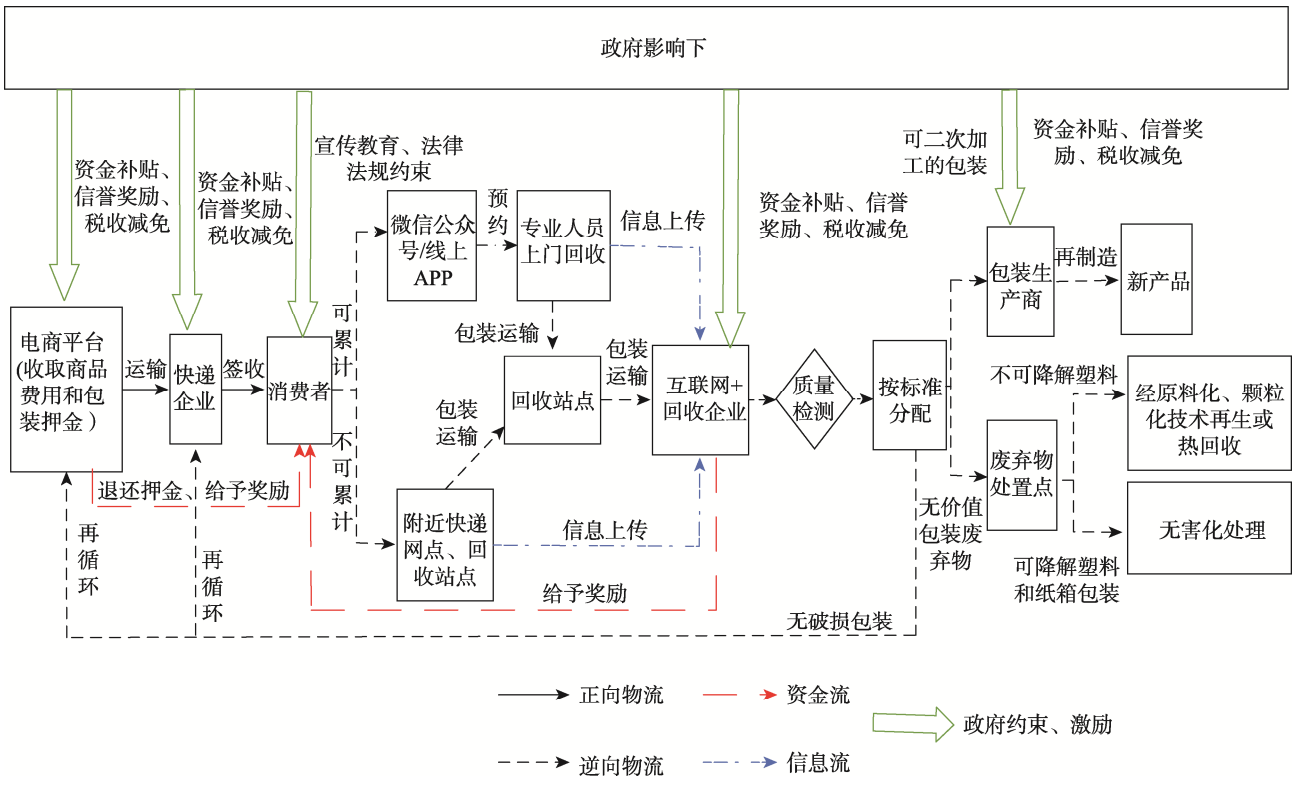

图 6　北京市快递包装逆向物流回收网络体系

Fig.6 Beijing express packaging reverse logistics recycling network system

4　结语

快递包装回收再利用是绿色物流得重要环节，是包装循环再利用的必由之路。本文在以往学者研究的基础上，提出了“互联网+TPR”的新回收模式。针对北京市的生产商自营回收、生产商联合回收、第三方回收和“互联网+TPR”回收这 4 种回收模式，构建了 4 种回收模式的数学模型；运用定性和定量法验证了“互联网+TPR”回收模式更优于其他 3 种，并根据实际情况引入了算例分析来验证 4 种回收模型的有效性。进一步优化了北京市的快递包装回收体系，解决了中小型企业的投入成本大、利润分配不均、信息流通慢的问题。本文研究了逆向物流回收新模式及构建的新体系，如何进行不同“角色”的利益分配，如何优化联合决策来实现其利润最大化目标将是进一步的研究方向。

参考文献：

[1] 李正军, 张震. 供给侧结构性改革视角下企业包装废弃物回收模式选择评价研究[J]. 生态经济, 2019, 35(3): 68-72.
LI Zheng-jun, ZHANG Zhen. Research on Evaluation of Enterprise Packaging Waste Recycling Mode Selection from the Perspective of Supply Side Structural Reform[J]. Ecological Economy, 2019, 35(3): 68-72.

[2] 戴雪红, 艾明浩. “互联网+” 背景下共享包装可持续发展的路径研究[J]. 包装工程, 2022, 43(8): 340-347.
DAI Xue-hong, AI Ming-hao. Sustainable Development Path of Shared Packaging under the Background of Internet Plus[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(8): 340-347.

[3] 倪明, 邵小伟, 郭军华, 等. 不确定需求及 WTP 差异条件下废弃电子产品再制造回收模式选择[J]. 系统工程, 2015, 33(10): 44-53.
NI Ming, SHAO Xiao-wei, GUO Jun-hua, et al. The Selection of Remanufacturing Recycling Model for Waste Electronic Products Based on Uncertain Demand and WTP Differentiation[J]. Systems Engineering, 2015, 33(10): 44-53.

[4] 朱凌云, 陈铭. 废旧动力电池逆向物流模式及回收网络研究[J]. 中国机械工程, 2019, 30(15): 1828-1836.
ZHU Ling-yun, CHEN Ming. Research on Reverse Logistics Model and Network for Used Electric Vehicle Batteries[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(15): 1828-1836.

[5] PAZOKI M, ZACCOUR G. Extended Producer Responsibility: Regulation Design and Responsibility Sharing Policies for a Supply Chain[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 236(1): 117516.

[6] 江丽娜. 基于逆向物流网络的包装废弃物回收研究及应用分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2020: 22-29.
JIANG Li-na. Research and Application Analysis of Packaging Waste Recycling Based on Reverse Logistics Network[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020: 22-29.

[7] LECLERC S, BADAMI M. Extended Producer Responsibility for E-Waste Management: Policy Drivers and Challenges[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 251: 119657.

[8] 魏洁. 废弃电器电子产品“互联网+”回收模式构建[J]. 科技管理研究, 2016, 36(21): 230-234.
Wei Jie. Construction Research on the "Internet +" Recycling Mode in Waste Electrical and Electronic Equipment Recovery[J]. Science and Technology Management Research, 2016, 36(21): 230-234.

[9] 安静宙. 互联网+废旧手机回收模式影响因素与政策仿真研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2017: 27-47.
AN Jing-zhou. Study on Influencing Factors and Policy Simulation of Recycling Mode of Used Mobile Phones in Internet Plus[D].Tianjin: Tianjin University of Technology, 2017: 27-47.

[10] 郭燕. “互联网+旧衣物回收”资源整合模式创新[J]. 毛纺科技, 2019, 47(4): 84-87.
GUO Yan. Model Innovation to Resources Integration under "Internet+Clothing Recycling"[J]. Wool Textile Journal, 2019, 47(4): 84-87.

[11] 许民利, 李圣兰, 郑杰. “互联网+回收” 情境下基于演化博弈的电子废弃物回收合作机理研究[J]. 运筹与管理, 2018, 27(9): 87-98.
XU Min-li, LI Sheng-lan, ZHENG Jie. Cooperation Mechanism of E-Waste Recycling in "Internet +Recycling" Environment Based on Evolutionary Game[J]. Operations Research and Management Science, 2018, 27(9): 87-98.

[12] 任鸣鸣, 仝好林. 基于模糊综台评价的 EPR 回收模式选择[J]. 统计与决策, 2009(15): 42-44.
REN Ming-ming, TONG Hao-lin. Selection of EPR Recovery Mode Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation[J]. Statistics and Decision, 2009(15): 42-44.

[13] 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 Qun, WEI Li-rong. A Multi-Objective Reverse Logistics Network Design Model under Stochastic Environment[J]. Soft Science, 2015, 29(10): 120-124.

[14] BOTTANI E, VIGNALI G, MOSNA D, et al. Economic and Environmental Assessment of Different Reverse Logistics Scenarios for Food Waste Recovery[J]. Sustainable Production and Consumption, 2019, 20: 289-303.

[15] SAFDAR N, KHALID R, AHMED W, et al. Reverse

Logistics Network Design of E-Waste Management under the Triple Bottom Line Approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 272(5): 122662.

[16] 刘子文. 不确定条件下电动汽车动力电池回收网络建模与优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2021: 28-50.
LIU Zi-wen. Modeling and Optimization of Electric Vehicle Battery Recovery Network under Uncertainty[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021: 28-50.

[17] 李姗姗, 韩阳洁, 赵英姿, 等. 不确定环境下快递包装物逆向物流网络设计[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2022, 39(1): 100-107.
LI Shan-shan, HAN Yang-jie, ZHAO Ying-zi, et al. Reverse Logistics Network Design of Express Package under Uncertain Environment[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2022, 39(1): 100-107.

[18] 宗刚, 魏素豪. 基于回收意识的废旧衣物回收模式对比分析[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(10): 2583-2589.
ZONG Gang, WEI Su-hao. The Comparative Study of Waste Recycling Pattern Based on Recycling Consciousness[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2016, 36(10): 2583-2589.

[19] CHIOU C, CHEN Hui, YU Cheng, et al. Consideration Factors of Reverse Logistics Implementation -a Case Study of Taiwan's Electronics Industry[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2012, 40: 375.

[20] 董庆银, 谭全银, 郝硕硕, 等. 北京市新能源汽车动力电池回收模式及经济性分析[J]. 科技管理研究, 2020, 40(20): 219-225.
DONG Qing-yin, TAN Quan-yin, HAO Shuo-shuo, et al. Recycling Modes and Economic Analysis of New Energy Vehicle Power Batteries in Beijing[J]. Science and Technology Management Research, 2020, 40(20): 219-225.

[21] DOWLATSHAHI S. A Strategic Framework for the Design and Implementation of Remanufacturing Operations in Reverse Logistics[J]. International Journal of Production Research, 2005, 43(16): 3455-3480.

[22] 卞文良, 潘岳, 王文宾, 等. 维修中心参与回收时闭环供应链的定价决策及回收模式选择[J]. 运筹与管理, 2021, 30(3): 76-82.
BIAN Wen-liang, PAN Yue, WANG Wen-bin, et al. Pricing and Recycling Mode Selection of Closed-Loop Supply Chain Considering the Maintenance Center Participation into Recycling Process[J]. Operations Research and Management Science, 2021, 30(3): 76-82.

[23] 倪明, 钱思源, 杨善林. 废旧手机回收模式研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2018, 17(4): 105-112.
NI Ming, QIAN Si-yuan, YANG Shan-lin. An Analysis on the Recycling Model of Discarded Cellphones[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2018, 17(4): 105-112.

[24] SAVASKAN R C, BHATTACHARYA S, VANWASSENHOVE L N. Closed-Loop Supply Chain Models with Product Remanufacturing[J]. Management Science, 2004, 50(2): 239-252.

[25] 代应. 废旧汽车资源化逆向物流运作管理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008: 43-97.
DAI Ying. Research on the Operation and Management of Reverse Logistics of Used and Waste Automobile Resources[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008: 43-97.

[26] 卢荣花, 李南. 电子产品闭环供应链回收渠道选择研究[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(7): 1687-1695.
LU Rong-hua, LI Nan. Take-Back Channel Selection of Closed-Loop Supply Chain for an Electronic Product[J]. Systems Engineering —Theory & Practice, 2016, 36(7): 1687-1695.

[27] 公彦德. 互联网+回收模式激励机制创新——以百度回收站为例[J]. 中国流通经济, 2019, 33(4): 65-75.
GONG Yan-de. Research on Incentive Mechanism Innovation of "Internet + Recycling" Model—A Case of Baidu Recycle Bin[J]. China Business and Market, 2019, 33(4): 65-75.

[28] 许民利, 邹康来, 简惠云. “互联网+” 环境下考虑消费者行为的资源回收策略[J]. 控制与决策, 2019, 34(8): 1745-1753
XU Min-li, ZOU Kang-lai, JIAN Hui-yun. Strategy of Renewable Resource Recycling Considering Consumers' Behavior Based on Internet+[J]. Control and Decision, 2019, 34(8): 1745-1753

[29] 周晓晔, 任贵彬, 马小云, 等. 快递包装回收网络中回收点选址研究[J]. 包装工程, 2020, 41(11): 201-208.
ZHOU Xiao-ye, REN Gui-bin, MA Xiao-yun, et al. Location Selection of Recycling Points in Express Packaging Recycling Network[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(11): 201-208.

[30] 李正军, 李恒. 政府管理下网络众包的快递包装回收模式创新[J]. 包装工程, 2018, 39(21): 133-138.
LI Zheng-jun, LI Heng. Innovation of Express Package Recovery Mode Based on Network Crowdsourcing under Government Management[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(21): 133-138.

责任编辑：曾钰婵