

# 废弃电子产品回收再利用网络组织演化研究

倪 明, 尚 婷, 郭军华

(华东交通大学, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 废弃电子产品回收再利用成为发展循环经济的主要途径之一。在对废弃电子产品回收再利用网络组织演化阶段系统分析的基础上, 建立废弃电子产品回收再利用网络组织演化模型, 并运用 Swarm 仿真平台对模型进行仿真, 得出演化规律。研究表明: 基于 SDN 的废弃电子产品回收再利用网络组织较联盟回收再利用网络组织在回收再利用总成本和效率上更有优势。

**关键词:** 废弃电子产品; 回收再利用; 网络组织; 演化

**中图分类号:** F 423.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1008-7192(2014)06-0038-07

## A Research on the Evolution of the Recovery and Reusing Network Organization of Electronic Waste

NI Ming, SHANG Ting, GUO Jun-hua

(East China Jiao Tong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** The recovery and reusing of electronic waste has become one of the main approaches to develop recycling economy. Based on a systematical analysis of the evolution stage of the recovery and reusing network organization of electronic waste, the paper establishes an evolution model and emulates it on the Swarm platform to find the evolution law. The research indicates that the SDN-based recovery and reusing network organization of electronic waste has more advantages over the Alliance recovery and reusing network organization in the overall recovery and reusing cost and efficiency.

**Key words:** electronic waste; recovery and reuse; network organization; evolution

随着经济的快速发展, 消费者对电子产品个性化和多样化的要求越来越高; 同时, 随着公众环保意识的增强, 政府推进循环经济力度逐渐加大。因此, 在上述双重压力下, 电子企业对废弃电子产品进行回收与再利用是迫在眉睫。为此, 国内外学术界和实践界也较为关注废弃电子产品回收再利用问题的研究。其中, 研究废弃电子产品回收再利用网络的文献, 主要体现在三个方面: ①从成本、效率角度研究废弃电子产品回收再利用网络。Tania&Oliveira(2011)<sup>[1]</sup>从成本和物流效率角度, 利

用启发式方法优化逆向物流网络。黄铮(2009)<sup>[2]</sup>考虑运输费用, 构建了三层逆向物流网络。范体军、常香云和陈荣秋(2009)等<sup>[3]</sup>以废旧产品回收利用的社会效益和经济效益为目标, 构建了大型非线性整数目标规划模型。②从仿真建模角度研究废弃电子产品回收再利用网络。秦小辉(2010)<sup>[4]</sup>将直接再利用、修理、再生、再制造、无害处理等回收处理方式考虑进来, 设计了独立型的废旧家电逆向物流网络结构, 建立了不确定环境下的混合整数规划模型, 并设计了启发式的遗传算法, 通过算例验证了模型和

**收稿日期:** 2014-09-24

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (70962010, 71262011, 71261005); 江西省人才基金—青年科学家培养计划项目 (20122BCB23009); 江西省自然科学基金项目 (20122BAB201041); 江西省高等学校科技落地计划项目 (KJLD13040); 赣鄱英才 555 工程项目 (赣组[2013]58 号); 江西省软科学项目 (20122BBA10101); 江西省教育厅科技项目 (GJJ13328)

**作者简介:**倪 明 (1974-), 男, 安徽桐城人, 华东交通大学经济管理学院教授, 博士, 研究方向为物流系统工程。

算法的有效性。刘枚莲、李慧兰和邱建伟(2011)<sup>[5]</sup>针对电子废弃物回收量不确定的情况，采用三角模糊数描述回收量，利用模糊统计方法计算模糊参数的隶属度，提出了一种基于模糊规划的电子废弃物逆向物流网络模型，并以广西电子废弃物逆向物流网络设计为例，运用 LINGO 9.0 软件对算例进行求解，验证了该方法的有效性。侯东亮、聂金权和邹律龙(2012)<sup>[6]</sup>针对废旧手机回收现状，研究了废旧手机逆向物流模式的选择问题，建立了基于网络层次分析法的废旧手机逆向物流模式的选择模型，并利用 Super Decision 决策软件对模型求解。③从概念建模角度研究废弃电子产品回收再利用网络。Thierry(1997)<sup>[7]</sup>提出了一种集生产、配送、回收和恢复为一体的概念模型，制造商生产新产品的同时负责产品的回收、恢复、再制造和再配送。文献<sup>[8-10]</sup>分别从逆向物流成员关系、产品回收策略等角度探讨了逆向物流回收处理的流程及模式。王文宾、达庆利和聂锐(2012)<sup>[11]</sup>分析了闭环供应链视角下废弃电子产品回收再利用结构，提出了三种可行的废弃电子产品回收再利用流程。

综上，当前文献主要集中在对回收再利用网络模型的构建上，通过确定回收再利用网络中的节点位置、数量，提高网络的经济效益与环境效益，而较少系统分析回收再利用网络的组织模式与演化

过程。因此，在参考现有文献基础上，通过分析废弃电子产品回收再利用网络组织的演化阶段，建立演化模型，并运用 Swarm 仿真平台对模型进行仿真，得出演化规律与结论。

### 一、相关概念界定

(1) 废弃电子产品，是指来自消费领域中各种达到或接近其生命周期终点而难以实现产品初始功能的电子产品。

(2) 废弃电子产品回收再利用，是指通过对废弃电子产品进行回收、检测、分类、修复、再制造、再循环和再销售等逆向运作，使其重新获得利用价值的过程。

(3) 废弃电子产品回收再利用网络组织，是指由客户、回收中心、再处理中心、废弃物处理中心和制造商等 5 种类型企业构成的，承担废弃电子产品的回收、检测、分类、修复、再制造、再循环和再销售等功能的组织系统。

### 二、废弃电子产品回收再利用网络组织简单阶段

#### 1. 简单阶段描述

废弃电子产品回收再利用网络组织的简单阶

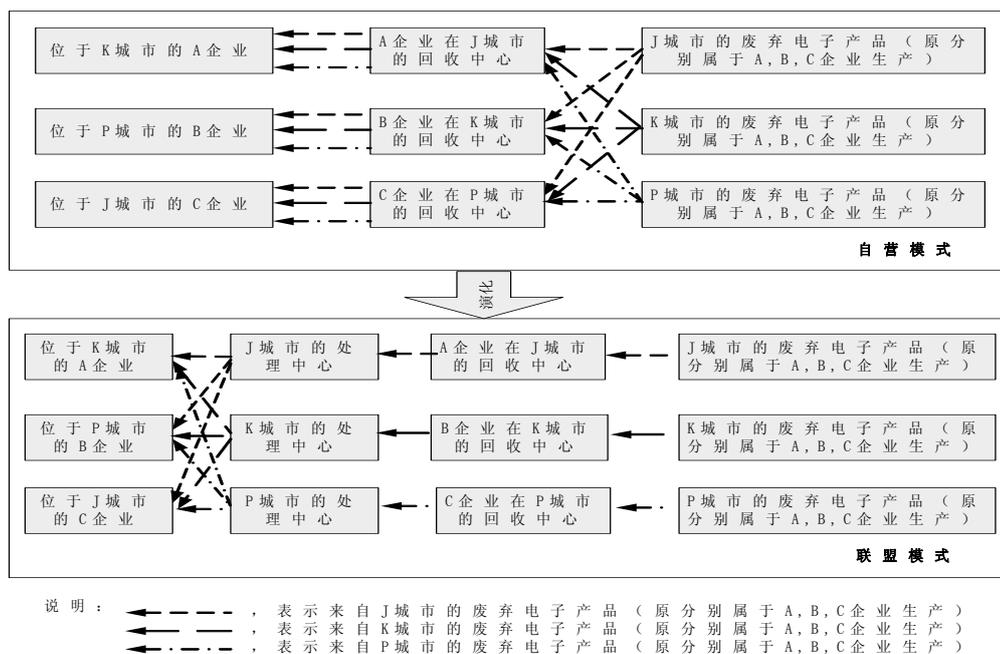


图 1 废弃电子产品回收再利用网络组织联盟模式示意图

段是指由两个或两个以上企业建立的联盟回收再利用网络组织模式（以下简称联盟模式）。联盟模

式，是指为了实现以较低成本回收再利用属于自己承当回收再利用责任的废弃电子产品，从事电子产

品生产的两个或两个以上企业共同签订回收再利用联盟契约,以就近方便为原则,完成联盟任一成员企业承担回收再利用责任的废弃电子产品回收与再利用业务,最终实现联盟成员企业“共赢和以低成本承担社会责任”。

### 2. 废弃电子产品回收再利用网络组织简单阶段结构

由图1可知,在自营模式下,A企业在P城市没有设立回收点(因A企业位于K城市,无需设回收点),则A企业在P城市产生的废弃电子产品需要先运送到J城市后,再集中运送位于K城市的企业进行再利用处理。显然,上述流程中增加了运输环节,如果A企业在P城市设立回收点,则因P城市回收点较多,出现资源配置过多而难以实现规模经济和提高效率。因此,A、B和C三个生产企业如果签订联盟契约,就会形成图中的联盟模式,联盟成员采取合作回收再利用方式,由P城市的C企业统一回收P城市中原属于A、B和C企业生产的废弃电子产品至C企业的回收中心,之后将有再利用价值的产品运往该地的处理中心对其进行再利用,最后将处理后的产品、零部件与原材料等运至各个原生产企业进行再销售和再制造。

## 三、废弃电子产品回收再利用网络组织复杂阶段

### 1. 废弃电子产品回收再利用网络组织复杂阶段描述

废弃电子产品回收再利用网络组织的复杂阶段是指回收企业间依托多功能开放型企业供需网(Supply and Demand Network with multi-functional and opening characteristics for enterprises, SDN)形成的回收再利用网络组织模式<sup>[12]</sup>(以下简称SDN模式)。

可以从两个方面来理解SDN模式的内涵:第一,SDN模式是事件驱动型的组织模式。该模式中企业间的信息交互建立在统一的信息平台上,当市场上出现回收事件时,信息平台会根据各网络成员的信誉、反应速度、合作成本、距离和满足处理事件能力等标准,寻找最佳合作伙伴,驱动合作组织形成。第二,SDN模式中的成员企业形成动态网络结构。合作组织根据事件要求,商定合作期限,在合作期内,合作成员处于合作态,处理完毕后,合

作期届满,合作组织解散,节点回到游离状态。

### 2. 废弃电子产品回收再利用网络组织复杂阶段结构

在图2中,SDN模式是依托供需网在全球范围内,由客户、回收中心、再处理中心、废弃物处理中心和制造商组成的动态网状结构。回收中心一般直接面向客户回收废弃电子产品,通过对回收的电子产品进行清洗、检测、分类、拆卸等处理,将有利用价值的产品及零部件运至再处理中心;再处理中心是对可修复的电子产品进行简单修复,对不可修复的电子产品提取可用的零部件与原材料,最后将处理后的产品、零部件与原材料等运至制造商进行再销售和再制造;废弃物处理中心是将回收中心和再处理中心处理过程中产生的废弃物进行填埋或焚烧等相关的处理。

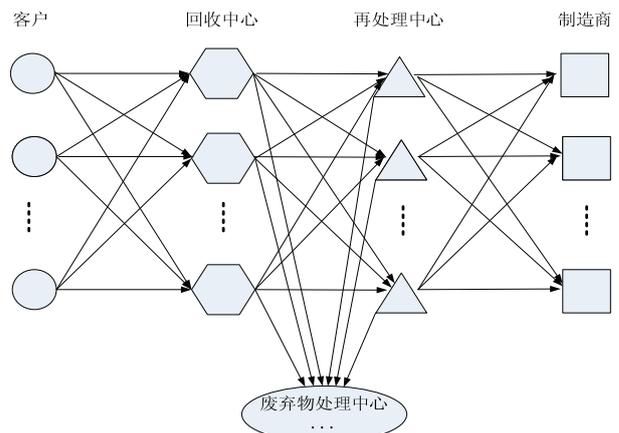


图2 废弃电子产品回收再利用网络组织SDN模式结构示意图

当有客户向SDN网络节点递交回收事件时,该节点会根据递交处理事件性质,启动SDN网络,借助于第三方信息平台,找寻成本和效率最优的回收中心、再处理中心、废弃物处理中心以及制造商的成员构成,保证了每次回收事件的效益与效率,当回收事件完成后,各企业重新回到游离态,游离态的节点致力于核心能力建设,以便在下一合作中凸显优势。

### 3. 废弃电子产品回收再利用网络组织复杂阶段优越性

为了更好地说明SDN模式相对于联盟模式的优越性,本文从供需活动的目标、供需资源、供需参与对象种类等方面对两者进行比较(表1)。

通过表1的比较可以看出,基于SDN的回收

再利用网络组织具有一定的优越性。

表1 废弃电子产品回收再利用网络组织模式比较

比较内容	联盟模式	SDN 模式
供需活动目标	以成本最小化完成供需任务, 目标定位在局部收益上。	提高企业的全球竞争力
供需资源	单以物力为供需中心资源, 同时附加信息与资金的流动。	物力、技术、人才、资金、信息、管理理念都能成为供需中心资源。
供需参与对象种类	同类型、等规模企业	制造企业、消费者、回收企业、再处理中心、合作子网等经济实体。
开放性	联盟体内企业合作的半开放系统	面向全球的充分开放系统
供需关系结构	由两个或两个以上企业建立的联盟回收再利用网络供需结构。	一个 SDN 企业可以同时处于多种供需关系结构中, 不同的关系结构中也可以存在一定的合作关系, 形成充分开放、合作的关系网。
供需功能性	供需功能单一, 与联盟外部企业进行资源集成的能力有限。	面向全球性的市场需求, 开展基于不同供需资源的多种供需活动。
市场响应性	通过联盟企业之间的合作提高对市场快速反映的能力。	基于“核心能力”的企业外部资源整合, 在短时间内实现对市场需求的敏捷响应。
资源共享范围	利用 EDI 及 Internet/Intranet 为网络媒介, 将联盟体内部各企业连接起来, 实现联盟体内部资源共享。	以互联网为全球网络媒介, 通过第三方集成化供需信息管理平台将所有相关企业融合起来, 实现全球资源共享。
供需中最终消费者的反馈信息	由于信息经企业联盟之间传递存在不可避免的扰动, 使最终消费者的直接参与受到限制。	通过功能强大的信息平台与最终消费者建立最大程度的直接沟通。

## 四、废弃电子产品回收再利用网络组织演化建模

### 1. 主体 Agent 的设计

对网络组织节点及其功能进行抽象, 可抽象出五类 Agent, 分别是客户 Agent、回收中心 Agent、再处理中心 Agent、废弃物处理中心 Agent 和制造商 Agent, 各主体 Agent 具体描述如下。

(1) 客户 Agent。客户 Agent 是指具有回收请求的消费群体的抽象。客户 Agent 向回收中心 Agent 发布回收请求以及废弃电子产品信息。当描述多个客户 Agent 时, 只需创建多个这样的对象。客户 Agent 建有客户位置和废弃电子产品量数据库。

(2) 回收中心 Agent。回收中心 Agent 的主要

功能是从客户手中收集废弃电子产品, 并将其运至回收中心进行检测与分类, 将有再利用价值的产品运至再处理中心, 同时将没有再利用价值的产品运至废弃物处理中心。回收中心 Agent 建有回收中心单位处理时间、单位处理成本、最大处理能力、客户到回收中心的单位运费和单位运输时间数据库。

(3) 再处理中心 Agent。再处理中心 Agent 的主要功能是对电子产品进行修复以及零部件与原材料的提取, 之后将修复后的产品、零部件与原材料等运至制造商, 同时将废弃物运至废弃物处理中心。再处理中心 Agent 建有再处理中心单位处理时间、单位处理成本、最大处理能力、回收中心到再处理中心和再处理中心到制造商的单位运费和单位运输时间数据库。

(4) 废弃物处理中心 Agent。废弃物处理中心 Agent 的主要功能是对从回收中心和再处理中心运来的废弃物进行最终处理。废弃物处理中心 Agent 建有废弃物处理中心单位处理时间、单位处理成本、最大处理能力、回收中心和再处理中心到废弃物处理中心的单位运费和单位运输时间数据库。

(5) 制造商 Agent。制造商 Agent 的主要功能

是接收从再处理中心运来的修复后的产品、可用的零部件与原材料，使其参与再销售与再制造流程。

### 2. 主体 Agent 的交互

在废弃电子产品回收再利用网络组织中，整个回收再利用逆向物流活动是由客户 Agent 的回收需求而驱动。各类主体 Agent 的交互模式见图 3。

在图 3 中，当客户 Agent 有回收需求时，会向

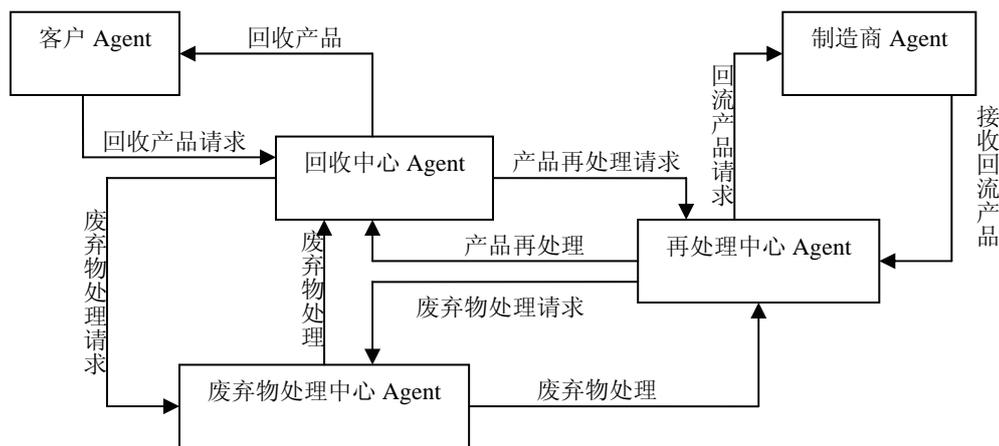


图 3 主体 Agent 的交互示意图

回收中心 Agent 发送回收产品请求，并告知对方自身的位置、产品重量等信息。回收中心 Agent 通过数据库计算比较，选择成本最低且效率最高的回收中心 Agent，对产品进行回收与清洗、检测、分类等处理，之后向再处理中心 Agent 发送产品再处理请求信息。再处理中心 Agent 通过计算比较，确定出成本最低且效率最高的再处理中心 Agent，对产品进行修复和零部件、原材料提取等处理，之后向制造商 Agent 发送回流产品请求信息。制造商 Agent 通过计算比较，确定出成本最低且效率最高的制造商 Agent，对处理后的产品、零部件与原材料进行再销售与再制造。此外，针对处理过程中产生的废弃物，回收中心 Agent 和再处理中心 Agent 向废弃物处理中心 Agent 发送废弃物处理请求信息，废弃物处理中心 Agent 通过计算比较，选出成本最低且效率最高的废弃物处理中心 Agent，对废弃物进行处理。通过各主体 Agent 之间的交互，使整个回收再利用流程得以低成本、高效率的完成。

## 五、废弃电子产品回收再利用网络组织演化仿真

### 1. 参数设置

本研究对废弃电子产品回收再利用网络组织的演化进行仿真，观察网络总成本、回收再利用效率以及网络结构的变化情况。由前文分析可知，该网络组织的演化是从简单阶段过渡到复杂阶段的过程，即从联盟模式过渡到 SDN 模式的过程。假设在第 100 时间步触发网络组织的第一次进化，即从自营模式过渡到联盟模式；在第 200 时间步触发网络组织的第二次进化，即从联盟模式过渡到 SDN 模式。本研究以某些客户的废弃电子产品回收需求而驱动的回收再利用事件为例进行测试，在每次回收事件中，对于联盟模式和 SDN 模式而言，每次参与合作的企业成员是动态变化的，各主体在经过一系列交互后会选择成本最小、效率最高的成员展开合作。客户的回收需求是随机变化的，且自营模式、联盟模式和 SDN 模式在对应时间步的回收需求是一致的。假设联盟模式和 SDN 模式中的客户

数目与客户废弃电子产品持有量均相同。回收中心和再处理中心的废弃物丢弃率服从 (0.1,0.5) 均匀分布。

### 2. 仿真实现

本仿真采用步长作为仿真时钟的度量单位，在 Swarm 仿真平台中对相关参数进行设定后仿真开

始，当步长达到 300 时，网络组织的演化呈现稳定状态，网络结构形成一定规模，仿真终止。仿真结果呈现了随着网络组织的演化，网络总成本、网络回收再利用效率，以及特定时间步的网络结构变化情况(图 4、图 5 和图 6)。

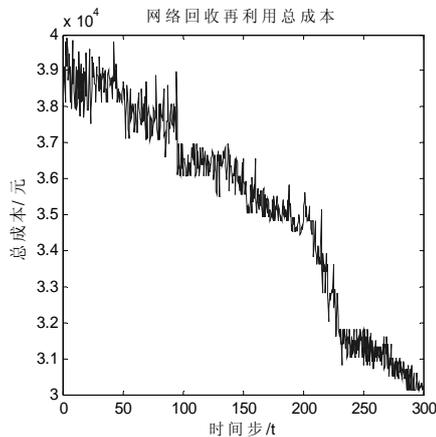


图 4 网络回收再利用总成本

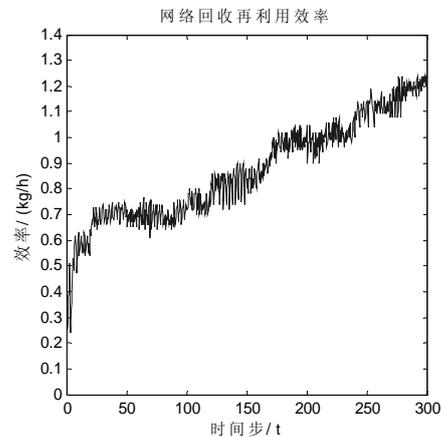


图 5 网络回收再利用效率

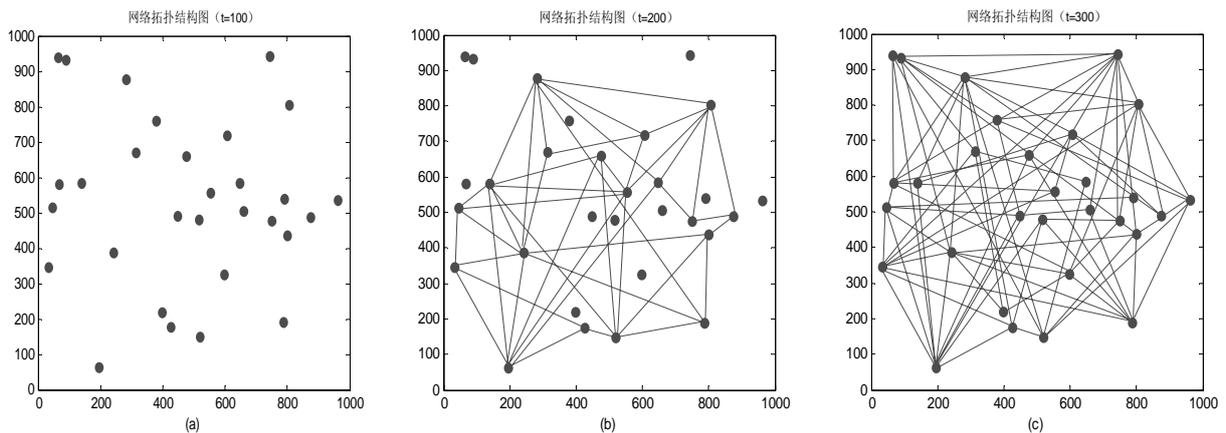


图 6 回收再利用网络组织结构

### 3. 仿真结果分析

在 0 至 100 时间步，企业采用自营模式，如图 6 (a) 所示，此时节点间无联系，企业独立承担回收再利用业务，由图 4 和图 5 可知，各时间步内网络回收再利用总成本大、效率低。在第 100 时间步以后，企业开始小范围产生合作，如图 6 (b) 所示，此时部分节点间建立合作关系，形成联盟组织，即处于网络组织简单阶段，完成了第一次进化，由图 4 和图 5 可知，此时较上一阶段而言，网络总成本有所下降，效率有所提升，但由于联盟模式可供选择的主体范围较小，因此变化幅度不大。从第 200 时间步以后，网络组织开始向 SDN 模式转化，即开始处于网络组织复杂阶段，网络进行第二次进

化，如图 6 (c) 所示，网络内节点数目增多，节点间建立多边关系，形成网络拓扑结构，此时由于每次回收事件可供选择的主体范围增加，由图 4 和图 5 可知，各时间步内网络总成本不断减少，效率逐步提升。因此，网络组织演化的过程，伴随的是网络总成本的不断降低，以及效率的不断提升，与此同时，网络成员节点数目在不断增加，网络从最开始节点间的彼此独立到最后形成了具有动态稳定性的网络拓扑结构，网络组织的敏捷性和集成度也在逐步提高，可以看出 SDN 模式是在联盟模式基础上发展起来的更高层次的合作模式，因而更适用于废弃电子产品回收再利用。

综上所述，可以得出如下演化规律。

(1) 在宏观层面上, 废弃电子产品回收再利用网络组织的演化过程是网络节点间不断建立关系的过程, 从少数节点之间通过签订协议形成联盟组织, 到分布广泛的大量节点依托供需网形成 SDN 网络组织, 这个过程使可供选择的主体范围逐渐增加, 主体间由单边关系逐渐转向多边关系, 网络组织的动态稳定性在不断增强, 敏捷性和集成度在逐步提高。

(2) 在微观层面上, 对于回收再利用事件而言, 伴随着废弃电子产品回收再利用网络组织的演化, 网络组织成员企业间的物流量可以得到更均衡的分配, 网络总成本不断减少, 回收再利用效率逐步提升。

## 六、结论与讨论

本文在对废弃电子产品回收再利用网络组织

的演化阶段进行系统分析的基础上, 通过构建废弃电子产品回收再利用网络组织演化模型, 并进行仿真实现, 得出了基于 SDN 的废弃电子产品回收再利用网络组织较联盟回收再利用网络组织在回收再利用总成本和效率上更有优势的结论, 并进一步总结了演化规律。研究结果为实际开展废弃电子产品回收再利用业务提供了参考, 通过构建基于 SDN 的废弃电子产品回收再利用网络组织, 对企业而言, 可以最大限度地降低企业实施回收物流的成本、提高其运作效率, 从而提升企业的收益, 提高企业参与回收物流活动积极性; 对社会而言, 可以提高资源利用率, 减少资源浪费, 减轻废弃电子产品对环境的污染, 这对于环境保护与循环经济的发展具有重要意义。为便于比较分析, 本文没有考虑其他网络组织模式。

## 参 考 文 献

- [1] TANIA RAMOS R, OLIVEIRA C. Delimitation of Service Areas in Reverse Logistic Networks with Multiple Depots[J]. Journal of the Operational Research Society, 2011, 7(62):1198-1210.
- [2] 黄铮. 废弃物回收逆向物流网络优化设计[J]. 系统工程, 2009, 27(7):50-53.
- [3] 范体军, 常香云, 陈荣秋, 胡清淮. 大型废旧产品回收网络的数学模型与算法研究[J]. 管理科学学报, 2009, 12(4):95-102.
- [4] 秦小辉. 不确定环境下独立型废旧家电逆向物流网络优化设计[J]. 统计与决策, 2010, 15(1):178-180.
- [5] 刘枚莲, 李慧兰, 邱建伟. 基于模糊规划的电子废弃物逆向物流网络设计[J]. 工业工程与管理, 2011, 16(2):109-122.
- [6] 侯东亮, 聂金权, 邹律龙. 废旧手机逆向物流模式的选择模型及求解方法[J]. 工业工程, 2012, 15(1):51-92.
- [7] THIERRY M. An analysis of the impact of product recovery management on manufacturing companies[D]. The Netherlands : Erasmus University Rotterdam, 1997.
- [8] JAYARAMAN V, GUIDE JR V, SRIVASTAVA R. A closed loop logistics model for remanufacturing[J]. Journal of the Operational Research Society, 1999(50):497-508.
- [9] KRIKKE HR, VAN HARTEN A. Schuur PC. Business case Oco: reverse logistics network redesign for copiers[J]. OR Spektrum, 1999, 21(3):381-409.
- [10] ANNA N, FUMINORI T. Reverse supply chain management and electronic waste recycling: a multitiered network equilibrium framework for e-cycling[J]. Transportation Research, 2005, 41(1):1-28.
- [11] 王文宾, 达庆利, 聂锐. 闭环供应链视角下废旧电器电子产品回收再利用的激励机制与对策[J]. 软科学, 2012, 26(8):44-48.
- [12] 倪明. 供需网理论及其在企业管理变革中的应用[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2011:20-35.