基于超网络的生态工业链动态均衡研究

王治莹，李春发
（天津理工大学管理学院，天津 300384）

摘要：通过分析生态工业链的结构，构建了将供应型企业、生产型企业、消费型企业及回收型企业耦合为一体的超网络模型。进而剖析了模型的影响因素，并通过量化这些因素和提出基本假设，运用变分不等式刻画了超网络模型中各层企业的行为和目标，得到了整个模型的动态均衡条件，给出了理论证明。在此基础上，结合动态均衡条件和 KKT 条件转换式，以贵港生态工业园的复合肥生态工业链为例，运用 Lingo9.0 和 Matlab7.0 进行模拟计算。结果表明，各层企业间契约履行率和操作技术参数与各层企业及整个生态工业链的利润率基本呈正比，而讨价还价能力值和交易损耗率与各层企业及整个生态工业链的利润率基本呈反比，计算结果与实际相符，验证了模型的有效性。

关键词：生态工业链；超网络；变分不等式；动态均衡
中图分类号：F062.2　**文献标识码**：A　**文章编号**：1004-6062(2014)01-0151-09

0 引言

近年来，生态工业园的建设倍受人们关注[1]。作为生态工业园建设的核心内容，生态工业共生网络是以成本推动、效益拉动和环境取向等外生机理及自组织和协同等内生机理共同作用而形成的具有"资源－产品－再生资源"模式的集合体[2]。而作为生态工业共生网络内核的生态工业链是指某一区域范围内具有产业衔接关系的企业为实现物质循环使用、能量阶梯利用和资源共享，以原料、信息、人才、技术等资源为纽带，模仿自然生态系统形成的综合了供应、生产、销售、回收等活动的复杂系统。当前有关生态工业链的规划设计的研究视角主要集中于工业共生[3]、工业代谢[4]及区域经济发展[5]等方面，而从系统或网络视角构建生态工业链中企业间关系模型的研究较少。

生态工业链是由多层拥有不同职责的企业按多维资源（原料，信息，技术等）交流关系构成的复杂系统，而具有多层性、多属性、多准则的"高于而又超于现存网络"的超网络[6]作为刻画这种多层次复杂系统的有效工具，近年来在供应链[7]、知识管理[8-9]、价格预测[10]及生物[11]领域均得到广泛应用，但在生态工业链中的应用较少。当前有关生态工业链的稳定性和均衡问题的研究也日益增多[12-13]，但从超网络和变分不等式的理论视角进行研究的相关成果较少。变分不等式在供应链中已经得到广泛应用[14-15]，但主要用于解决静态均衡问题，较少考虑到时间因素导致的动态均衡问题，而生态工业链是随时间发生动态变化的企业联盟系统[13]。作者曾基于委托代理关系运用变分不等式研究过生态工业链的静态均衡问题[13]，考虑了企业追求利润最大化目标，但未全面分析生态工业链中不同类型的企业，且未剖析其与供应链的运作特征的区别，而生态工业链中企业的稳定运营有其考虑环境影响的独特目标和随时间变化的独有影响因素。

基于以上分析，本文首先对生态工业链的结构进行分析，从网络视角构建生态工业链的超网络模型，并剖析模型的影响因素；其次，在引入交易期变量基础上，针对一些不确定情况给出几个基本假设并运用变分不等式分别刻画超网络模型中各层企业的行为和目标；再次，通过对各层企业的分析得到超网络模型的动态均衡条件，并给出相应的证明；最后，以广西贵港生态工业园为例，构建其复合肥生态工业链的超网络模型，并分别考察随时间变化的网络均衡影响因素对各层企业及生态工业链均衡的影响，以期为生态工业链可持续运作和发展提供有意义的参考价值。

1 生态工业链的结构分析与超网络模型构建

1.1 生态工业链结构分析

生态工业链的本质是实现一个生产过程的副产品和废弃物成为另一个生产过程的原材料，以达到经济效益、社会效益和环境效益三位一体的最大化。在如图 1 所示的生态工业链中，供应型企业是整个生态工业链的发起端，受经济效益、社会效益及环境效益的驱动将新材料出售给生产型企业；生产型企业主要是指制造企业，在生产产品的过程中，不仅需要购买供应型企业的新材料，在保证产品质量的前提下还可根据生态工业链闭环的特点购买回收型企业的廉价旧材料，并将生产的新产品出售给消费型企业；消费型企业相当于供应链中需求市场的作用，是产品的使用者，并将不再

收稿日期：2012-03-19　**修回日期**：2013-01-12
基金项目：国家社会科学基金资助项目(08BJY004)
作者简介：王治莹(1987—)，男，山东济南人，天津理工大学管理学院硕士研究生，学士，研究方向：超网络理论与应用。

满足其效用的废旧产品出售给回收型企业;回收型企业负责从消费型企业回收和处理废旧产品,将可再利用的旧材料出售给生产型企业,并将不可再利用的废弃物运送到垃圾处理厂按一定标准进行填埋或焚烧。

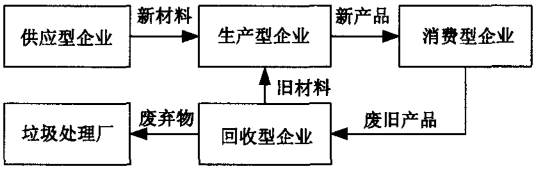

图1 生态工业链的运作流程

1.2 生态工业链的超网络模型构建

假定供应型企业、生产型企业、消费型企业和回收型企业的数目分别为 M、I、J、K,则依据超网络的层次划分标准[16],可构建如图2所示的具有四层企业网络的超网络模型。在该模型中,同层企业间不仅存在合作关系,还存在竞争关系,是一种竞合关系,既可记为有向也可记为无向。因此若将企业作为结点,将同层企业间的竞合关系作为边或弧,则可构建四个同层企业网络。进而可按生态工业链中资源流动关系建立不同层企业网络间的映射关系,即与某一供应型企业合作的生产型企业有哪些,与某一生产型企业合作的供应型企业、消费型企业及回收型企业有哪些,与某一消费型企业合作的生产型企业和回收型企业有哪些,与某一回收型企业合作的生产型企业和消费型企业有哪些。从而可将四个同层企业网络按这些映射关系耦合为超网络模型。

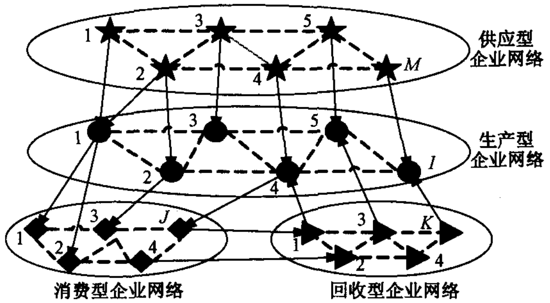

图2 生态工业链的超网络模型

1.3 模型的影响因素分析

根据经济学理论,影响生态工业链的超网络模型中各企业利益动态均衡的因素主要有:交易费用、惩罚费用、操作技术利润及环境成本。

(1)交易费用是指不同类型的企业进行交易时产生的附加费用,如运输费、差旅费、产品装卸费、信息收集费、搬运劳务费、银行索取费等。交易费用的大小主要取决于交易量的大小,一般而言,交易量越大,交易费用越大;同时,交易费用还受交易双方讨价还价能力的影响。

(2)惩罚费用是指不同类型的企业进行交易时由于某一企业违约,按事先规定对其进行惩罚造成的损失。惩罚费用的大小主要取决于契约履行率大小。企业的契约履行率越低,则该企业的信誉度越差,因此必须使用较高的惩罚费用约束该企业履行契约;另外,惩罚费用受交易量影响。在违规或破坏契约前提下,交易量越大,惩罚费用越大。

(3)操作技术利润是指不同类型的企业进行交易时因自身所独有的运营手段或营销技巧所获得的额外收益。第一,操作技术利润与企业自身的技术水平有关,因此定义操作技术参数为企业通过运用自身操作技术获得的额外利润与正常利润的比值;第二,操作技术利润与契约履行率有关,在满足一定大小契约条件下运用操作技术才有实际意义;第三,操作技术利润还与交易量有关。在同等操作技术水平和契约履行率约束下,交易量越大,操作技术利润越大。

(4)环境成本是指不同类型的企业进行交易时所造成的环境处理成本。其大小主要取决于各企业自身的客观情况决定的交易损耗率大小,一般而言,交易损耗率越大,造成的环境影响越大;同时,环境成本还与交易量有关。在同等交易损耗率前提下,交易量越大,造成的环境影响也大。

2 模型中各层企业的行为和目标分析

鉴于在生态工业链的运作过程中存在一些不确定因素,给出如下基本假设:

(1)不考虑同层企业之间横向耦合,各层企业按市场自由交易;

(2)各企业都是理性的,以追求自身利润最大化和环境影响最小化为目标;

(3)仅考虑生产或回收一种产品或其可替代产品,且再生产品和新产品没有本质区别。

2.1 相关变量的符号表示

为便于对各层企业的行为和目标进行刻画,对文中涉及到的变量进行说明,如表1所示。

表1 变量及解释

变量表示	变量释义
m	供应型企业 $m \in \{1,\cdots,M\}$
i	生产型企业 $i \in \{1,\cdots,I\}$
j	消费性企业 $j \in \{1,\cdots,J\}$
k	回收型企业 $k \in \{1,\cdots,K\}$
t	交易期 $t \in [0,T]$ 且为整数
q_{im}^t	供应型企业 m 与生产型企业 i 在交易期 t 内的交易量,M 个供应型企业和 I 个生产型企业在交易期 t 内的交易量组成矩阵 $Q_1^t \in R_{+t}^{IM}$
q_{ij}^t	生产型企业 i 与消费型企业 j 在交易期 t 内的交易量,I 个生产型企业和 J 个消费型企业在交易期 t 内的交易量组成矩阵 $Q_4^t \in R_{+t}^{IJ}$
q_{ik}^t	生产型企业 i 与回收型企业 k 在交易期 t 内的交易量,I 个生产型企业和 K 个回收型企业在交易期 t 内的交易量组成矩阵 $Q_2^t \in R_{+t}^{IK}$
q_{jk}^t	消费型企业 j 与回收型企业 k 在交易期 t 内的交易量,J 个消费型企业和 K 个回收型企业在交易期 t 内的交易量组成矩阵 $Q_5^t \in R_{+t}^{JK}$

续表 1

变量表示	变量释义
d_{mi}^t	供应型企业 m 在交易期 t 内对生产型企业 i 的讨价还价能力，$d_{mi}^t \in [0,1]$
$\hat{d}_{mi}^t$	生产型企业 i 在交易期 t 内对供应型企业 m 的讨价还价能力，$\hat{d}_{mi}^t \in [0,1]$
d_{ij}^t	生产型企业 i 在交易期 t 内对消费型企业 j 的讨价还价能力，$d_{ij}^t \in [0,1]$
d_{ik}^t	生产型企业 i 在交易期 t 内对回收型企业 k 的讨价还价能力，$d_{ik}^t \in [0,1]$
$\hat{d}_{ij}^t$	消费型企业 j 在交易期 t 内对生产型企业 i 的讨价还价能力，$\hat{d}_{ij}^t \in [0,1]$
$\hat{d}_{ik}^t$	回收型企业 k 在交易期 t 内对生产型企业 i 的讨价还价能力，$\hat{d}_{ik}^t \in [0,1]$
$\hat{d}_{jk}^t$	回收型企业 k 在交易期 t 内对消费型企业 j 的讨价还价能力，$\hat{d}_{jk}^t \in [0,1]$
h_{mi}^t	供应型企业 m 在交易期 t 内对生产型企业 i 的契约履行率，$h_{mi}^t \in [0,1]$
$\hat{h}_{mi}^t$	生产型企业 i 在交易期 t 内对供应型企业 m 的契约履行率，$\hat{h}_{mi}^t \in [0,1]$
h_{ij}^t	生产型企业 i 在交易期 t 内对消费型企业 j 的契约履行率，$h_{ij}^t \in [0,1]$
h_{ik}^t	生产型企业 i 在交易期 t 内对回收型企业 k 的契约履行率，$h_{ik}^t \in [0,1]$
$\hat{h}_{ij}^t$	消费型企业 j 在交易期 t 内对生产型企业 i 的契约履行率，$\hat{h}_{ij}^t \in [0,1]$
$\hat{h}_{ik}^t$	回收型企业 k 在交易期 t 内对生产型企业 i 的契约履行率，$\hat{h}_{ik}^t \in [0,1]$
$\hat{h}_{jk}^t$	回收型企业 k 在交易期 t 内对消费型企业 j 的契约履行率，$\hat{h}_{jk}^t \in [0,1]$
a_{mi}^t	供应型企业 m 在交易期 t 内对生产型企业 i 的操作技术参数，$a_{mi}^t \in [0,1]$
$\hat{a}_{mi}^t$	生产型企业 i 在交易期 t 内对供应型企业 m 的操作技术参数，$\hat{a}_{mi}^t \in [0,1]$
a_{ij}^t	生产型企业 i 在交易期 t 内对消费型企业 j 的操作技术参数，$a_{ij}^t \in [0,1]$
a_{ik}^t	生产型企业 i 在交易期 t 内对回收型企业 k 的操作技术参数，$a_{ik}^t \in [0,1]$
$\hat{a}_{ij}^t$	消费型企业 j 在交易期 t 内对生产型企业 i 的操作技术参数，$\hat{a}_{ij}^t \in [0,1]$
$\hat{a}_{ik}^t$	回收型企业 k 在交易期 t 内对生产型企业 i 的操作技术参数，$\hat{a}_{ik}^t \in [0,1]$
$\hat{a}_{jk}^t$	回收型企业 k 在交易期 t 内对消费型企业 j 的操作技术参数，$\hat{a}_{jk}^t \in [0,1]$
b_{mi}^t	供应型企业 m 与生产型企业 i 在交易期 t 内交易时供应型企业 m 的损耗率，$b_{mi}^t \in [0,1]$
$\hat{b}_{mi}^t$	生产型企业 i 与供应型企业 m 在交易期 t 内交易时生产型企业 i 的损耗率，$\hat{b}_{mi}^t \in [0,1]$
b_{ij}^t	生产型企业 i 与消费型企业 j 在交易期 t 内交易时生产型企业 i 的损耗率，$b_{ij}^t \in [0,1]$
b_{ik}^t	生产型企业 i 与回收型企业 k 在交易期 t 内交易时生产型企业 i 的损耗率，$b_{ik}^t \in [0,1]$
$\hat{b}_{ij}^t$	消费型企业 j 与生产型企业 i 在交易期 t 内交易时消费型企业 j 的损耗率，$\hat{b}_{ij}^t \in [0,1]$
$\hat{b}_{ik}^t$	回收型企业 k 与生产型企业 i 在交易期 t 内交易时回收型企业 k 的损耗率，$\hat{b}_{ik}^t \in [0,1]$
$\hat{b}_{jk}^t$	回收型企业 k 与消费型企业 j 在交易期 t 内交易时回收型企业 k 的损耗率，$\hat{b}_{jk}^t \in [0,1]$
ρ_{ij}^t	生产型企业 i 在交易期 t 内对消费型企业 j 的单位产品交易价格
ρ_{im}^t	供应型企业 m 在交易期 t 内对生产型企业 i 的单位新材料交易价格
ρ_{ik}^t	回收型企业 k 在交易期 t 内对生产型企业 i 的单位旧材料交易价格
ρ_{jk}^t	回收型企业 k 在交易期 t 内对消费型企业 j 的单位废旧产品交易价格
ρ_{3j}^t	消费型企业 j 在交易期 t 内对产品的支付能力，也即产品的需求价格，$\sum_{j=1}^{J}\rho_{3j}^t = \rho_3^t$
$\hat{\rho}_k^t$	回收型企业 k 在交易期 t 内对不可回收废弃物的单位处理费用
β_{i1}^t	生产型企业 i 在交易期 t 内生产产品过程中，新材料到产品的转化率，$\beta_{i1}^t \in [0,1]$
β_{i2}^t	生产型企业 i 在交易期 t 内生产产品过程中，旧材料到产品的转化率，$\beta_{i2}^t \in [0,1]$
w_j^t	消费型企业 j 在交易期 t 内的废旧产品回收率，$w_j^t \in [0,1]$
π_k^t	回收型企业 k 和所有消费型企业交易的废旧产品的可用材料转化率，$\pi_k^t \in [0,1]$
$\hat{\pi}_k^t$	回收型企业 k 和所有消费型企业交易的废旧产品的废弃物转化率，$\hat{\pi}_k^t \in [0,1]$

2.2 供应型企业的行为和目标分析

供应型企业 m 在交易期 t 内的总成本等于采购成本 $f_m(Q_1^t)$、交易费用 $c_{mi}^t(d_{mi}^t, q_{im}^t)$ 和惩罚费用 $g_{mi}^t(h_{mi}^t, q_{im}^t)$ 之和；总收益等于其将新材料出售给生产型企业所获取的正常收

益和操作技术利润 $e^t_{mi} = a^t_{mi}E^t_{mi}(h^t_{mi}, q^t_{im})$ 之和。则其利润最大化目标可记为

$$\max Z^t_{1m} = \sum_{t=1}^{T} \Big[\sum_{i=1}^{I} \rho^{*t}_{im} q^t_{im} + \sum_{i=1}^{I} e^t_{mi}(h^t_{mi}, q^t_{im}) - f^t_m(Q^t_1) - \sum_{i=1}^{I} c^t_{mi}(d^t_{mi}, q^t_{im}) - \sum_{i=1}^{I} g^t_{mi}(h^t_{mi}, q^t_{im}) \Big] \qquad (1)$$

另外,供应型企业 m 还追求环境影响最小化,即

$$\min Z^t_{2m} = \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{I} r^t_{mi}(q^t_{im}) \qquad (2)$$

标准权函数 $W^t_{hM}(Z^t_{hM})$ 和价值函数 $U_m = Z^t_{1m} - W^t_{2m}(Z^t_{2m})Z^t_{2m}$ 被广泛应用于解决多标准决策问题[17]。本文采用常数权重且为 1 的标准权函数[18],该函数在金融领域有广泛应用[19],则供应型企业 m 的利润最大化问题可表示为:

$$\max U_m = Z^t_{1m} - Z^t_{2m} = \sum_{t=1}^{T} \Big[\sum_{i=1}^{I} \rho^{*t}_{im} q^t_{im} + \sum_{i=1}^{I} e^t_{mi}(h^t_{mi}, q^t_{im}) - f^t_m(Q^t_1) - \sum_{i=1}^{I} c^t_{mi}(d^t_{mi}, q^t_{im}) - \sum_{i=1}^{I} g^t_{mi}(h^t_{mi}, q^t_{im}) - \sum_{i=1}^{I} r^t_{mi}(q^t_{im}) \Big]$$

$$(q^t_{im}, \rho^{*t}_{im} \geq 0, 0 \leq d^t_{mi}, h^t_{mi} \leq 1, \forall\ m, i, t) \qquad (3)$$

若假定式(3)中的所有函数均为连续可微凸函数,则式(3)的解 $(Q^t_1, d^t_1, h^t_1) \in R^{3IM}_{+t}$ 等价于如下变分不等式的解:

$$\sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{I} \sum_{m=1}^{M} \Big[\frac{\partial f^t_m(Q^t_1)}{\partial q^t_{im}} + \frac{\partial c^t_{mi}(d^t_{mi}, q^t_{im})}{\partial q^t_{im}} + \frac{\partial g^t_{mi}(h^t_{mi}, q^t_{im})}{\partial q^t_{im}} + \frac{\partial r^t_{mi}(q^t_{im})}{\partial q^t_{im}} - \frac{\partial e^t_{mi}(h^t_{mi}, q^t_{im})}{\partial q^t_{im}} - \rho^{*t}_{im} \Big] \times (q^t_{im} - q^{*t}_{im}) + \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{I} \sum_{m=1}^{M} \Big[\frac{\partial c^t_{mi}(d^t_{mi}, q^t_{im})}{\partial d^t_{mi}} \Big] \times (d^t_{mi} - d^{*t}_{mi}) + \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{I} \sum_{m=1}^{M} \Big[\frac{\partial g^t_{mi}(h^t_{mi}, q^t_{im})}{\partial h^t_{mi}} - \frac{\partial e^t_{mi}(h^t_{mi}, q^t_{im})}{\partial h^t_{mi}} \Big] \times (h^t_{mi} - h^{*t}_{mi}) \geq 0 \qquad (4)$$

$$\forall (q^t_{im}, d^t_{mi}, h^t_{mi}) \in K^t_1 \equiv \Big[(Q^t_1, d^t_1, h^t_1) \,\Big|\, q^t_{im} \geq 0, d^t_{mi} \geq 0, h^t_{mi} \geq 0, \forall\, m, i, t \Big]$$

2.3 生产型企业的行为和目标分析

生产型企业 i 在交易期 t 内的总成本等于新旧材料的生产费用($f_{i1}(Q^t_1) = \beta^t_{i1}F^t_{i1}(Q^t_1)$、$f_{i2}(Q^t_2) = \beta^t_{i2}F^t_{i2}(Q^t_2)$)、交易费用($\hat{c}^t_{mi}(\hat{d}^t_{mi}, q^t_{im})$、$c^t_{ij}(d^t_{ij}, q^t_{ij})$、$c^t_{ik}(d^t_{ik}, q^t_{ik})$)、惩罚费用($\hat{g}^t_{mi}(\hat{h}^t_{mi}, q^t_{im})$、$g^t_{ij}(h^t_{ij}, q^t_{ij})$、$g^t_{ik}(h^t_{ik}, q^t_{ik})$)、正常支付费用之和;总收益等于将新产品出售给消费型企业的正常收益和操作技术利润($\hat{e}^t_{mi} = \hat{a}^t_{mi}\hat{E}^t_{mi}(\hat{h}^t_{mi}, q^t_{im})$、$e^t_{ij} = a^t_{ij}E^t_{ij}(h^t_{ij}, q^t_{ij})$、$e^t_{ik} = a^t_{ik}E^t_{ik}(h^t_{ik}, q^t_{ik})$)之和;环境影响函数为 $\hat{r}^t_{mi} = \hat{b}^t_{mi}\hat{R}^t_{mi}(q^t_{im})$、$r^t_{ij} = b^t_{ij}R^t_{ij}(q^t_{ij})$ 和 $r^t_{ik} = b^t_{ik}R^t_{ik}(q^t_{ik})$。若同样采用权重为 1 的标准权函数和价值函数,则其最优化目标可表示为

$$\max U_i = Z^t_{1i} - Z^t_{2i} = \sum_{t=1}^{T} \Big[\sum_{j=1}^{J} \rho^{*t}_{ij} q^t_{ij} + \sum_{m=1}^{M} \hat{e}^t_{mi}(\hat{h}^t_{mi}, q^t_{im}) + \sum_{j=1}^{J} e^t_{ij}(h^t_{ij}, q^t_{ij}) + \sum_{k=1}^{K} e^t_{ik}(h^t_{ik}, q^t_{ik}) - f_{i1}(Q^t_1) - f_{i2}(Q^t_2) - \sum_{m=1}^{M} \hat{c}^t_{mi}(\hat{d}^t_{mi}, q^t_{im}) - \sum_{j=1}^{J} c^t_{ij}(d^t_{ij}, q^t_{ij}) - \sum_{k=1}^{K} c^t_{ik}(d^t_{ik}, q^t_{ik}) - \sum_{m=1}^{M} \hat{g}^t_{mi}(\hat{h}^t_{mi}, q^t_{im}) - \sum_{j=1}^{J} g^t_{ij}(h^t_{ij}, q^t_{ij}) - \sum_{k=1}^{K} g^t_{ik}(h^t_{ik}, q^t_{ik}) - \sum_{k=1}^{K} \rho^{*t}_{ik} q^t_{ik} - \sum_{m=1}^{M} \rho^{*t}_{im} q^t_{im} - \sum_{m=1}^{M} \hat{r}^t_{mi}(q^t_{im}) - \sum_{j=1}^{J} r^t_{ij}(q^t_{ij}) - \sum_{k=1}^{K} r^t_{ik}(q^t_{ik}) \Big] \qquad (5)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j=1}^{J} q^t_{ij} \leq \beta^t_{i1} \sum_{m=1}^{M} q^t_{im} + \beta^t_{i2} \sum_{k=1}^{K} q^t_{ik}$$

$$(q^t_{ij}, q^t_{im}, q^t_{ik}, \rho^{*t}_{ij}, \rho^{*t}_{ik}, \rho^{*t}_{im} \geq 0, 0 \leq d^t_{ij}, \hat{d}^t_{mi}, d^t_{ik}, h^t_{ij}, \hat{h}^t_{mi}, h^t_{ik}, \beta^t_{i1}, \beta^t_{i2} \leq 1, \forall\ m, i, j, k, t)$$

显然,作为凸规划的解 $(Q^t_4, Q^t_1, Q^t_2, h^t_1, \hat{h}^t_2, h^t_3, d^t_1, \hat{d}^t_2, d^t_3, \lambda^t_1) \in R^{3IJ+3IM+3IK+I}_{+t}$ 等价于如下变分不等式的解:

$$\sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} \Big[\frac{\partial c^t_{ij}(d^t_{ij}, q^t_{ij})}{\partial q^t_{ij}} + \frac{\partial g^t_{ij}(h^t_{ij}, q^t_{ij})}{\partial q^t_{ij}} + \lambda^{*t}_{1i} + \frac{\partial r^t_{ij}(q^t_{ij})}{\partial q^t_{ij}} - \frac{\partial e^t_{ij}(h^t_{ij}, q^t_{ij})}{\partial q^t_{ij}} - \rho^{*t}_{ij} \Big] \times (q^t_{ij} - q^{*t}_{ij}) + \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{I} \sum_{m=1}^{M} \Big[\frac{\partial f^t_{i1}(Q^t_1)}{\partial q^t_{im}} + \frac{\partial \hat{c}^t_{mi}(\hat{d}^t_{mi}, q^t_{im})}{\partial q^t_{im}} + \frac{\partial \hat{g}^t_{mi}(\hat{h}^t_{mi}, q^t_{im})}{\partial q^t_{im}} + \rho^{*t}_{im} + \frac{\partial \hat{r}^t_{mi}(q^t_{im})}{\partial q^t_{im}} - \frac{\partial \hat{e}^t_{mi}(\hat{h}^t_{mi}, q^t_{im})}{\partial q^t_{im}} - \beta^t_{i1}\lambda^{*t}_{1i} \Big] \times (q^t_{im} - q^{*t}_{im}) + \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{I} \sum_{k=1}^{K} \Big[\frac{\partial f^t_{i2}(Q^t_2)}{\partial q^t_{ik}} + \frac{\partial c^t_{ik}(d^t_{ik}, q^t_{ik})}{\partial q^t_{ik}} + \frac{\partial g^t_{ik}(h^t_{ik}, q^t_{ik})}{\partial q^t_{ik}} + \rho^{*t}_{ik} + \frac{\partial r^t_{ik}(q^t_{ik})}{\partial q^t_{ik}} - \frac{\partial e^t_{ik}(h^t_{ik}, q^t_{ik})}{\partial q^t_{ik}} - \beta^t_{i2}\lambda^{*t}_{1i} \Big] \times (q^t_{ik} - q^{*t}_{ik}) + \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} \Big[\frac{\partial g^t_{ij}(h^t_{ij}, q^t_{ij})}{\partial h^t_{ij}} - \frac{\partial e^t_{ij}(h^t_{ij}, q^t_{ij})}{\partial h^t_{ij}} \Big] \times (h^t_{ij} - h^{*t}_{ij}) + \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{I} \sum_{m=1}^{M} \Big[\frac{\partial \hat{g}^t_{mi}(\hat{h}^t_{mi}, q^t_{im})}{\partial \hat{h}^t_{mi}} - \frac{\partial \hat{e}^t_{mi}(\hat{h}^t_{mi}, q^t_{im})}{\partial \hat{h}^t_{mi}} \Big] \times (\hat{h}^t_{mi} - \hat{h}^{*t}_{mi}) + \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{I} \sum_{k=1}^{K} \Big[\frac{\partial g^t_{ik}(h^t_{ik}, q^t_{ik})}{\partial h^t_{ik}} - \frac{\partial e^t_{ik}(h^t_{ik}, q^t_{ik})}{\partial h^t_{ik}} \Big] \times (h^t_{ik} - h^{*t}_{ik}) + \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} \Big[\frac{\partial c^t_{ij}(d^t_{ij}, q^t_{ij})}{\partial d^t_{ij}} \Big] \times (d^t_{ij} - d^{*t}_{ij}) + \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{I} \sum_{m=1}^{M} \Big[\frac{\partial \hat{c}^t_{mi}(\hat{d}^t_{mi}, q^t_{im})}{\partial \hat{d}^t_{mi}} \Big] \times (\hat{d}^t_{mi} - \hat{d}^{*t}_{mi}) + \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{I} \sum_{k=1}^{K} \Big[\frac{\partial c^t_{ik}(d^t_{ik}, q^t_{ik})}{\partial d^t_{ik}} \Big] \times (d^t_{ik} - d^{*t}_{ik}) + \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{I} \Big[\beta^t_{i1} \sum_{m=1}^{M} q^t_{im} + \beta^t_{i2} \sum_{k=1}^{K} q^t_{ik} - \sum_{j=1}^{J} q^t_{ij} \Big] \times (\lambda^t_{1i} - \lambda^{*t}_{1i}) \geq 0 \qquad (6)$$

$$\forall (q^t_{ij}, q^t_{im}, q^t_{ik}, h^t_{ij}, \hat{h}^t_{mi}, h^t_{ik}, d^t_{ij}, \hat{d}^t_{mi}, d^t_{ik}, \lambda^t_{1i}) \in K^t_2 \equiv [(Q^t_4, Q^t_1, Q^t_2, h^t_1, \hat{h}^t_2, h^t_3, d^t_1, \hat{d}^t_2, d^t_3, \lambda^t_1) \mid q^t_{ij}, q^t_{im}, q^t_{ik}, \lambda^t_{1i} \geq 0, 0 \leq h^t_{ij}, \hat{h}^t_{mi}, h^t_{ik} \leq 1, 0 \leq d^t_{ij}, \hat{d}^t_{mi}, d^t_{ik} \leq 1, \forall\, m, i, j, k, t]$$

其中,λ^{*t}_{1i} 是保证约束不等式成立的拉格朗日系数,λ^t_1 是所有拉格朗日系数构成的列向量。

2.4 消费型企业的行为和目标分析

若在交易期 t 内,消费型企业 j 与生产型企业 i 间的交易函数、惩罚函数、操作技术函数、环境影响函数分别为 $\hat{c}^t_{ij}(\hat{d}^t_{ij}, q^t_{ij})$、$\hat{g}^t_{ij}(\hat{h}^t_{ij}, q^t_{ij})$、$\hat{e}^t_{ij} = \hat{a}^t_{ij}\hat{E}^t_{ij}(\hat{h}^t_{ij}, q^t_{ij})$、$\hat{r}^t_{ij} = \hat{b}^t_{ij}\hat{R}^t_{ij}(q^t_{ij})$,则消费型企业 j 在交易期 t 内进行交易时,存在如下关系[20]:

$$\Big[\rho^{*t}_{ij} + \frac{\partial \hat{c}^t_{ij}(\hat{d}^t_{ij}, q^t_{ij})}{\partial q^t_{ij}} + \frac{\partial \hat{g}^t_{ij}(\hat{h}^t_{ij}, q^t_{ij})}{\partial q^t_{ij}} + \frac{\partial \hat{r}^t_{ij}(q^t_{ij})}{\partial q^t_{ij}} -$$

$$\frac{\partial \hat{e}_{ij}^t(\hat{h}_{ij}^t, q_{ij}^t)}{\partial q_{ij}^t}\Big]\begin{cases} = \rho_{3j}^{*t}, 若\ q_{ij}^t > 0 \\ \geq \rho_{3j}^{*t}, 若\ q_{ij}^t = 0\end{cases} \tag{7}$$

设消费型企业 j 在交易期 t 内的需求函数为 $s_j^t = s_j^t(\rho_3^t)$，则存在如下供需平衡关系[21]：

$$s_j^t(\rho_3^{*t})\begin{cases} = \sum_{i=1}^I q_{ij}^{*t}, 若\ \rho_{3j}^{*t} > 0 \\ \leq \sum_{i=1}^I q_{ij}^{*t}, 若\ \rho_{3j}^{*t} = 0\end{cases} \tag{8}$$

在逆向物流中,若在交易期 t 内所有消费型企业的废旧产品总量为 Q_3^t，则交易发生函数为

$$\alpha_j^t(Q_3^t)\begin{cases} = \rho_{jk}^{*t}, 若\ q_{jk}^{*t} > 0 \\ \geq \rho_{jk}^{*t}, 若\ q_{jk}^{*t} = 0\end{cases}$$

$$\text{s. t.}\ \sum_{k=1}^K q_{jk}^t \leq w_j^t \sum_{i=1}^I q_{ij}^t \tag{9}$$

综上,可通过如下变分不等式求得消费型企业在最优目标下的解 $(Q_4^t, Q_2^t, \rho_3^t, \lambda_2^t) \in R_{+t}^{IJ+JK+2J}$：

$$\sum_{t=1}^T\sum_{i=1}^I\sum_{j=1}^J\Big[\rho_{ij}^{*t} + \frac{\partial \hat{c}_{ij}^t(\hat d_{ij}^t,q_{ij}^t)}{\partial q_{ij}^t} + \frac{\partial \hat g_{ij}^t(\hat h_{ij}^t,q_{ij}^t)}{\partial q_{ij}^t} + \frac{\partial \hat r_{ij}^t(q_{ij}^t)}{\partial q_{ij}^t} - \frac{\partial \hat e_{ij}^t(\hat h_{ij}^t,q_{ij}^t)}{\partial q_{ij}^t} - \rho_{3j}^{*t} - w_j^t\lambda_{2j}^{*t}\Big]\times(q_{ij}^t - q_{ij}^{*t}) + \sum_{t=1}^T\sum_{j=1}^J\sum_{k=1}^K[\alpha_j^t(Q_3^{*t}) - \rho_{jk}^{*t} + \lambda_{2j}^{*t}]\times(q_{jk}^t - q_{jk}^{*t}) + \sum_{t=1}^T\sum_{j=1}^J[\sum_{i=1}^I q_{ij}^{*t} - s_j^t(\rho_3^{*t})]\times(\rho_{3j}^t - \rho_{3j}^{*t}) + \sum_{t=1}^T\sum_{j=1}^J[w_j^t\sum_{i=1}^I q_{ij}^t - \sum_{k=1}^K q_{jk}^t]\times(\lambda_{2j}^t - \lambda_{2j}^{*t}) \geq 0$$

$$\forall (q_{ij}^t, q_{jk}^t, \rho_{3j}^t, \lambda_{2j}^t) \in K_3^t \equiv [(Q_4^t, Q_2^t, \rho_3^t, \lambda_2^t) \mid q_{ij}^t \geq 0, q_{jk}^t \geq 0, \rho_{3j}^t \geq 0, \lambda_{2j}^t \geq\geq 0, \forall i,j,k,t] \tag{10}$$

其中，λ_{2j}^t 是保证约束不等式(38)成立的拉格朗日系数，λ_2^t 是所有拉格朗日系数所构成的列向量。

2.5 回收型企业的行为和目标分析

回收型企业从消费型企业中收集废旧产品,将可再利用材料和废弃物分离。回收型企业 k 在交易期 t 内的总成本等于收购、运输及仓储费用 $c_k^t(Q_5^t)$、交易费用($\hat c_{ik}^t(\hat d_{ik}^t, q_{ik}^t)$、$\hat c_{jk}^t(\hat d_{jk}^t, q_{jk}^t)$)、惩罚费用($\hat g_{ik}^t(\hat h_{ik}^t, q_{ik}^t)$、$\hat g_{jk}^t(\hat h_{jk}^t, q_{jk}^t)$)、废弃物的处理费用 $\hat\rho_k^t\pi_k^t\sum_{j=1}^J q_{jk}^t$、正常支付费用之和;总收益等于将废旧产品出售给生产型企业的正常收益和操作技术利润($\hat e_{ik}^t = \hat a_{ik}^t\hat E_{ik}^t(\hat h_{ik}^t, q_{ik}^t)$、$\hat e_{jk}^t = \hat a_{jk}^t\hat E_{jk}^t(\hat h_{jk}^t, q_{jk}^t)$)之和;环境影响函数为 $\hat r_{ik}^t = \hat b_{ik}^t\hat R_{ik}^t(q_{ik}^t)$、$\hat r_{jk}^t = \hat b_{jk}^t\hat R_{jk}^t(q_{jk}^t)$。若同样采用权重为 1 的标准权函数和价值函数,则其最优化目标为

$$\max U_k = Z_{1k}^t - Z_{2k}^t = \sum_{t=1}^T\Big[\sum_{i=1}^I \rho_{ik}^{*t}q_{ik}^t + \sum_{i=1}^I \hat e_{ik}^t(\hat h_{ik}^t, q_{ik}^t) + \sum_{j=1}^J \hat e_{jk}^t(\hat h_{jk}^t, q_{jk}^t) - c_k^t(Q_5^t) - \sum_{i=1}^I \hat c_{ik}^t(\hat d_{ik}^t, q_{ik}^t) - \sum_{j=1}^J \hat c_{jk}^t(\hat d_{jk}^t, q_{jk}^t) - \sum_{i=1}^I \hat g_{ik}^t(\hat h_{ik}^t, q_{ik}^t) - \sum_{j=1}^J \hat g_{jk}^t(\hat h_{jk}^t, q_{jk}^t) - \hat\rho_k^t\pi_k^t\sum_{j=1}^J q_{jk}^t - \sum_{j=1}^J \rho_{jk}^{*t}q_{jk}^t - \sum_{i=1}^I \hat r_{ik}^t(q_{ik}^t) - \sum_{j=1}^J \hat r_{jk}^t(q_{jk}^t)\Big]$$

$$\text{s. t}\ \sum_{i=1}^I q_{ik}^t \leq \pi_k^t\sum_{j=1}^J q_{jk}^t(q_{ik}^t, q_{jk}^t, \rho_{ik}^{*t}, \rho_{jk}^{*t}, \hat\rho_k^t \geq 0,$$

$$0 \leq \hat d_{ik}^t, \hat d_{jk}^t, \hat h_{ik}^t, \hat h_{jk}^t, \hat\pi_k^t, \pi_k^t \leq 1, \forall i,j,k,t) \tag{11}$$

作为凸规划的解 $(Q_2^t, Q_5^t, h_1^t, h_2^t, d_1^t, d_2^t, \lambda_3^t) \in R_{+t}^{3IK+3JK+K}$ 等价于其对应的变分不等式的解:

$$\sum_{t=1}^T\sum_{i=1}^I\sum_{k=1}^K\Big[\frac{\partial \hat c_{ik}^t(\hat d_{ik}^t, q_{ik}^t)}{\partial q_{ik}^t} + \frac{\partial \hat g_{ik}^t(\hat h_{ik}^t, q_{ik}^t)}{\partial q_{ik}^t} + \lambda_{3k}^{*t} + \frac{\partial \hat r_{ik}^t(q_{ik}^t)}{\partial q_{ik}^t} - \frac{\partial \hat e_{ik}^t(\hat h_{ik}^t, q_{ik}^t)}{\partial q_{ik}^t} - \rho_{ik}^{*t}\Big]\times(q_{ik}^t - q_{ik}^{*t}) + \sum_{t=1}^T\sum_{j=1}^J\sum_{k=1}^K\Big[\frac{\partial c_k^t(Q_5^{*t})}{\partial q_{jk}^t} + \frac{\partial \hat c_{jk}^t(\hat d_{jk}^t, q_{jk}^t)}{\partial q_{jk}^t} + \frac{\partial \hat g_{jk}^t(\hat h_{jk}^t, q_{jk}^t)}{\partial q_{jk}^t} + \hat\rho_k^t\hat\pi_k^t + \rho_{jk}^{*t} + \frac{\partial \hat r_{jk}^t(q_{jk}^t)}{\partial q_{jk}^t} - \frac{\partial \hat e_{jk}^t(\hat h_{jk}^t, q_{jk}^t)}{\partial q_{jk}^t} - \pi_k^t\lambda_{3k}^{*t}\Big]\times(q_{jk}^t - q_{jk}^{*t}) + \sum_{t=1}^T\sum_{i=1}^I\sum_{k=1}^K\Big[\frac{\partial \hat g_{ik}^t(\hat h_{ik}^t, q_{ik}^t)}{\partial \hat h_{ik}^t} - \frac{\partial \hat e_{ik}^t(\hat h_{ik}^t, q_{ik}^t)}{\partial \hat h_{ik}^t}\Big]\times(\hat h_{ik}^t - \hat h_{ik}^{*t}) + \sum_{t=1}^T\sum_{j=1}^J\sum_{k=1}^K\Big[\frac{\partial \hat g_{jk}^t(\hat h_{jk}^t, q_{jk}^t)}{\partial \hat h_{jk}^t} - \frac{\partial \hat e_{jk}^t(\hat h_{jk}^t, q_{jk}^t)}{\partial \hat h_{jk}^t}\Big]\times(\hat h_{jk}^t - \hat h_{jk}^{*t}) + \sum_{t=1}^T\sum_{i=1}^I\sum_{k=1}^K\Big[\frac{\partial \hat c_{ik}^t(\hat d_{ik}^t, q_{ik}^t)}{\partial \hat d_{ik}^t}\Big]\times(\hat d_{ik}^t - \hat d_{ik}^{*t}) + \sum_{t=1}^T\sum_{j=1}^J\sum_{k=1}^K\Big[\frac{\partial \hat c_{jk}^t(\hat d_{jk}^t, q_{jk}^t)}{\partial \hat d_{jk}^t}\Big]\times(\hat d_{jk}^t - \hat d_{jk}^{*t}) + \sum_{t=1}^T\sum_{k=1}^K\Big[\pi_k^t\sum_{j=1}^J q_{jk}^t - \sum_{i=1}^I q_{ik}^t\Big]\times(\lambda_{3k}^t - \lambda_{3k}^{*t}) \geq 0$$

$$\forall (q_{ik}^t, q_{jk}^t, \hat h_{ik}^t, \hat h_{jk}^t, \hat d_{ik}^t, \hat d_{jk}^t, \lambda_{3k}^t) \in K_4^t \equiv [(Q_2^t, Q_5^t, h_1^t, h_2^t, d_1^t, d_2^t, \lambda_3^t) \mid 0 \leq \hat h_{ik}^t, \hat h_{jk}^t, \hat d_{ik}^t, \hat d_{jk}^t \leq 1, q_{ik}^t, q_{jk}^t, \lambda_{3k}^t \geq 0, \forall i,j,k,t] \tag{12}$$

其中，λ_{3k}^t 是保证约束式成立的拉格朗日系数，λ_3^t 是所有拉格朗日系数构成的列向量。

3 模型的动态均衡条件分析

由以上分析可知,生态工业链的超网络模型的动态均衡状态[17]是:存在唯一解 $(Q_4^t, Q_1^t, Q_2^t, Q_5^t, d_1^t, d_2^t, d_3^t, d_4^t, d_5^t, d_6^t, h_1^t, h_2^t, h_3^t, h_4^t, h_5^t, h_6^t, \lambda_1^t, \lambda_2^t, \lambda_3^t, \rho_3^t) \in R_{+t}^{3IJ+5IM+5IK+3JK+I+2J+K}$，满足:

$$\sum_{t=1}^T\sum_{i=1}^I\sum_{j=1}^J\Big[\frac{\partial c_{ij}^t(d_{ij}^t, q_{ij}^t)}{\partial q_{ij}^t} + \frac{\partial g_{ij}^t(h_{ij}^t, q_{ij}^t)}{\partial q_{ij}^t} + \frac{\partial r_{ij}^t(q_{ij}^t)}{\partial q_{ij}^t} + \lambda_{1i}^{*t} + \frac{\partial \hat c_{ij}^t(\hat d_{ij}^t, q_{ij}^t)}{\partial q_{ij}^t} + \frac{\partial \hat g_{ij}^t(\hat h_{ij}^t, q_{ij}^t)}{\partial q_{ij}^t} + \frac{\partial \hat r_{ij}^t(q_{ij}^t)}{\partial q_{ij}^t} - \frac{\partial e_{ij}^t(h_{ij}^t, q_{ij}^t)}{\partial q_{ij}^t} - \frac{\partial \hat e_{ij}^t(\hat h_{ij}^t, q_{ij}^t)}{\partial q_{ij}^t} - \rho_{3j}^{*t} - w_j^t\lambda_{2j}^{*t}\Big]\times(q_{ij}^t - q_{ij}^{*t}) + \sum_{t=1}^T\sum_{i=1}^I\sum_{m=1}^M\Big[\frac{\partial f_m^t(Q_1^t)}{\partial q_{im}^t} + \frac{\partial c_{mi}^t(d_{mi}^t, q_{im}^t)}{\partial q_{im}^t} + \frac{\partial g_{mi}^t(h_{mi}^t, q_{im}^t)}{\partial q_{im}^t} + \frac{\partial r_{mi}^t(q_{im}^t)}{\partial q_{im}^t} + \frac{\partial f_{i1}^t(Q_1^t)}{\partial q_{im}^t} + \frac{\partial \hat c_{mi}^t(\hat d_{mi}^t, q_{im}^t)}{\partial q_{im}^t} + \frac{\partial \hat g_{mi}^t(\hat h_{mi}^t, q_{im}^t)}{\partial q_{im}^t} + \frac{\partial \hat r_{mi}^t(q_{im}^t)}{\partial q_{im}^t} - \frac{\partial e_{mi}^t(h_{mi}^t, q_{im}^t)}{\partial q_{im}^t} - \frac{\partial \hat e_{mi}^t(\hat h_{mi}^t, q_{im}^t)}{\partial q_{im}^t} - \beta_{i1}^t\lambda_{1i}^{*t}\Big]\times(q_{im}^t - q_{im}^{*t}) + \sum\sum_{t=1}^T\sum_{i=1}^I\sum_{k=1}^K\Big[\frac{\partial f_{i2}^t(Q_2^t)}{\partial q_{ik}^t} + \frac{\partial c_{ik}^t(d_{ik}^t, q_{ik}^t)}{\partial q_{ik}^t} + \frac{\partial g_{ik}^t(h_{ik}^t, q_{ik}^t)}{\partial q_{ik}^t} + \frac{\partial r_{ik}^t(q_{ik}^t)}{\partial q_{ik}^t} + \frac{\partial \hat c_{ik}^t(\hat d_{ik}^t, q_{ik}^t)}{\partial q_{ik}^t} + \lambda_{3k}^{*t} + \frac{\partial \hat g_{ik}^t(\hat h_{ik}^t, q_{ik}^t)}{\partial q_{ik}^t} + \frac{\partial \hat r_{ik}^t(q_{ik}^t)}{\partial q_{ik}^t} - \frac{\partial e_{ik}^t(h_{ik}^t, q_{ik}^t)}{\partial q_{ik}^t} - \frac{\partial \hat e_{ik}^t(\hat h_{ik}^t, q_{ik}^t)}{\partial q_{ik}^t} - \beta_{i2}^t\lambda_{1i}^{*t}\Big]\times$$

$$
\begin{aligned}
&(q_{ik}^{t}-q_{ik}^{*t})+\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\left[\alpha_{j}^{t}(Q_{3}^{*t})+\lambda_{2j}^{*t}+\frac{\partial c_{k}^{t}(Q_{5}^{*t})}{\partial q_{jk}^{t}}+\frac{\partial \hat{c}_{jk}^{t}(\hat{d}_{jk}^{t},q_{jk}^{t})}{\partial q_{jk}^{t}}+\frac{\partial \hat{g}_{jk}^{t}(\hat{h}_{jk}^{t},q_{jk}^{t})}{\partial q_{jk}^{t}}+\hat{\rho}_{k}^{t}\hat{\pi}_{k}^{t}+\frac{\partial \hat{r}_{jk}^{t}(q_{jk}^{t})}{\partial q_{jk}^{t}}-\frac{\partial \hat{e}_{jk}^{t}(\hat{h}_{jk}^{t},q_{jk}^{t})}{\partial q_{jk}^{t}}-\pi_{k}^{t}\lambda_{3k}^{*t}\right]\times\\
&(q_{jk}^{t}-q_{jk}^{*t})+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\left[\frac{\partial c_{ij}^{t}(d_{ij}^{t},q_{ij}^{t})}{\partial d_{ij}^{t}}\right]\times(d_{ij}^{t}-d_{ij}^{*t})+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{M}\left[\frac{\partial c_{mi}^{t}(d_{mi}^{t},q_{im}^{t})}{\partial d_{mi}^{t}}\right]\times(d_{mi}^{t}-d_{mi}^{*t})+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}\left[\frac{\partial c_{ik}^{t}(d_{ik}^{t},q_{ik}^{t})}{\partial d_{ik}^{t}}\right]\times\\
&(d_{ik}^{t}-d_{ik}^{*t})+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{M}\left[\frac{\partial \hat{c}_{mi}^{t}(\hat{d}_{mi}^{t},q_{im}^{t})}{\partial \hat{d}_{mi}^{t}}\right]\times(\hat{d}_{mi}^{t}-\hat{d}_{mi}^{*t})+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}\left[\frac{\partial \hat{c}_{ik}^{t}(\hat{d}_{ik}^{t},q_{ik}^{t})}{\partial \hat{d}_{ik}^{t}}\right]\times(\hat{d}_{ik}^{t}-\hat{d}_{ik}^{*t})+\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\left[\frac{\partial \hat{c}_{jk}^{t}(\hat{d}_{jk}^{t},q_{jk}^{t})}{\partial \hat{d}_{jk}^{t}}\right]\times\\
&(\hat{d}_{jk}^{t}-\hat{d}_{jk}^{*t})+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\left[\frac{\partial g_{ij}^{t}(h_{ij}^{t},q_{ij}^{t})}{\partial h_{ij}^{t}}-\frac{\partial e_{ij}^{t}(h_{ij}^{t},q_{ij}^{t})}{\partial h_{ij}^{t}}\right]\times(h_{ij}^{t}-h_{ij}^{*t})+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{M}\left[\frac{\partial g_{mi}^{t}(h_{mi}^{t},q_{im}^{t})}{\partial h_{mi}^{t}}-\frac{\partial e_{mi}^{t}(h_{mi}^{t},q_{im}^{t})}{\partial h_{mi}^{t}}\right]\times(h_{mi}^{t}-h_{mi}^{*t})+\\
&\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{M}\left[\frac{\partial \hat{g}_{mi}^{t}(\hat{h}_{mi}^{t},q_{im}^{t})}{\partial \hat{h}_{mi}^{t}}-\frac{\partial \hat{e}_{mi}^{t}(\hat{h}_{mi}^{t},q_{im}^{t})}{\partial \hat{h}_{mi}^{t}}\right]\times(\hat{h}_{mi}^{t}-\hat{h}_{mi}^{*t})+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}\left[\frac{\partial g_{ik}^{t}(h_{ik}^{t},q_{ik}^{t})}{\partial h_{ik}^{t}}-\frac{\partial e_{ik}^{t}(h_{ik}^{t},q_{ik}^{t})}{\partial h_{ik}^{t}}\right]\times(h_{ik}^{t}-h_{ik}^{*t})+\\
&\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}\left[\frac{\partial \hat{g}_{ik}^{t}(\hat{h}_{ik}^{t},q_{ik}^{t})}{\partial \hat{h}_{ik}^{t}}-\frac{\partial \hat{e}_{ik}^{t}(\hat{h}_{ik}^{t},q_{ik}^{t})}{\partial \hat{h}_{ik}^{t}}\right]\times(\hat{h}_{ik}^{t}-\hat{h}_{ik}^{*t})+\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\left[\frac{\partial \hat{g}_{jk}^{t}(\hat{h}_{jk}^{t},q_{jk}^{t})}{\partial \hat{h}_{jk}^{t}}-\frac{\partial \hat{e}_{jk}^{t}(\hat{h}_{jk}^{t},q_{jk}^{t})}{\partial \hat{h}_{jk}^{t}}\right]\times(\hat{h}_{jk}^{t}-\hat{h}_{jk}^{*t})+\\
&\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\left[\beta_{i1}^{t}\sum_{m=1}^{M}q_{im}^{t}+\beta_{i2}^{t}\sum_{k=1}^{K}q_{ik}^{t}-\sum_{j=1}^{J}q_{ij}^{t}\right]\times(\lambda_{1i}^{t}-\lambda_{1i}^{*t})+\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\left[w_{j}^{t}\sum_{i=1}^{I}q_{ij}^{t}-\sum_{k=1}^{K}q_{jk}^{t}\right]\times(\lambda_{2j}^{t}-\lambda_{2j}^{*t})+\\
&\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}\left[\pi_{k}^{t}\sum_{j=1}^{J}q_{jk}^{t}-\sum_{i=1}^{I}q_{ik}^{t}\right]\times(\lambda_{3k}^{t}-\lambda_{3k}^{*t})+\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\left[\sum_{i=1}^{I}q_{ij}^{*t}-s_{j}^{t}(\rho_{3}^{*t})\right]\times(\rho_{3j}^{t}-\rho_{3j}^{*t})\geqslant 0
\end{aligned}
\tag{13}
$$

$\forall(Q_4^t,Q_1^t,Q_2^t,Q_5^t,d_1^t,d_2^t,d_3^t,d_4^t,d_5^t,d_6^t,h_1^t,h_2^t,h_3^t,h_4^t,h_5^t,h_6^t,\lambda_1^t,\lambda_2^t,\lambda_3^t,\rho_3^t)\in K^t$,其中:$K^t\equiv\{(Q_4^t,Q_1^t,Q_2^t,Q_5^t,d_1^t,d_2^t,d_3^t,d_4^t,d_5^t,d_6^t,h_1^t,h_2^t,h_3^t,h_4^t,h_5^t,h_6^t,\lambda_1^t,\lambda_2^t,\lambda_3^t,\rho_3^t)\mid(Q_4^t,Q_1^t,Q_2^t,Q_5^t,d_1^t,d_2^t,d_3^t,d_4^t,d_5^t,d_6^t,h_1^t,h_2^t,h_3^t,h_4^t,h_5^t,h_6^t,\lambda_1^t,\lambda_2^t,\lambda_3^t,\rho_3^t)\in R_{+t}^{3IJ+5IM+5IK+3JK+I+2J+K}\}$

证明:将变分不等式(4),(6),(10),(12)相加化简可得到变分不等式(13)。若在变分不等式(13)第一个中括号中加入 $-\rho_{ij}^{*t}+\rho_{ij}^{*t}$,在第二个中括号中加入 $-\rho_{im}^{*t}+\rho_{im}^{*t}$,在第三个中括号中加入 $-\rho_{ik}^{*t}+\rho_{ik}^{*t}$,在第四个中括号中加入 $-\rho_{jk}^{*t}+\rho_{jk}^{*t}$,则不影响变分不等式(13)的解,可知此时的变分不等式(13)即为变分不等式(4),(6),(10),(12)之和,证毕!

4 案例分析

4.1 案例介绍

广西贵港生态工业园是国内建设最早,目前发展最为完善的糖生产基地,是单中心依托型工业共生网络的典型代表。贵港生态工业园以制糖、酒精和造纸为核心产业,产生大量蔗渣和糖渣。贵糖集团于 1999 年开始引入和研发新工艺,以工业生态学理论为指导,建立起三条主要生态工业链(甘蔗—制糖—蔗渣造纸工业链、制糖—糖蜜制酒精—酒精废液制复合肥工业链及制糖—低聚果糖工业链)和六大主要系统(蔗田系统、制糖系统、酒精系统、造纸系统、热电联产系统及环境综合处理系统),这三条生态工业链和六大主要系统均通过产品和废弃物等资源的相互交换而紧密衔接,形成一个纵横交错的闭合生态工业共生网络,如图 3 所示。

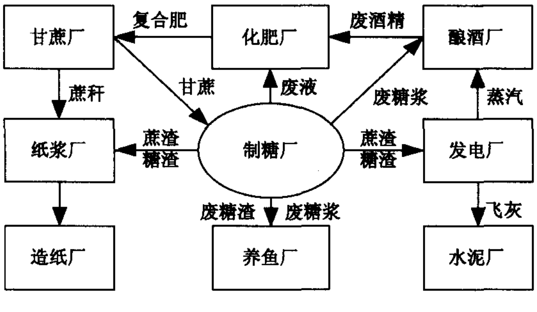

图 3 贵港生态工业园的结构

由酿酒厂、化肥厂、甘蔗厂及制糖厂构成的复合肥生态工业链,如图 4 所示。为研究方便,仅以该生态工业链为研究对象,验证模型的合理性,并分析讨价还价能力、契约履行率、操作技术参数及交易损耗率等参数的变动对各层企业网络和整个生态工业链的超网络动态均衡的影响。在图 4 中,酿酒厂为化肥厂提供废酒精,相当于供应型企业;化肥厂为甘蔗厂提供复合肥,并接受酿酒厂提供的废酒精,相当于生产型企业;甘蔗厂为制糖厂提供甘蔗(甘蔗作为复合肥副产品的可替代品),并接受化肥厂提供的复合肥,相当于消费型企业;制糖厂为化肥厂提供废液等可用材料,并接受甘蔗厂提供的甘蔗,相当于回收型企业。依据本文的超网络模型构建方法,图 4 所示的生态工业链可构建具有四层企业网络且各层网络均包含一个企业的超网络模型。

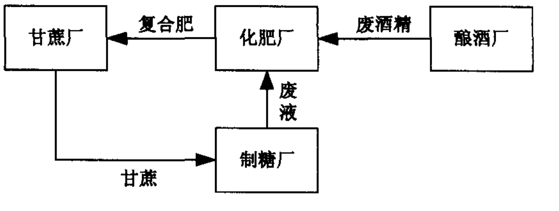

图 4 复合肥生态工业链

4.2 案例中各层企业的函数

依据成本与收益函数的设计标准[22],可给出模型中各层企业的成本和收益函数。

(1)供应型企业(酿酒厂)的函数

$$f_m^t(Q_1^t)=(q_{im}^t)^2+q_{im}^t;c_{mi}^t(d_{mi}^t,q_{im}^t)=(1-d_{mi}^t)(q_{im}^t)^2+q_{im}^t;$$

$$g_{mi}^t(h_{mi}^t,q_{im}^t)=(1-h_{mi}^t)(q_{im}^t)^2;e_{mi}^t(h_{mi}^t,q_{im}^t)=(a_{mi}^t)^2h_{mi}^tq_{im}^t;$$

$$r_{mi}^t(q_{im}^t)=(b_{mi}^t)^2(q_{im}^t)^2$$

(2)生产型企业(化肥厂)的函数

$$f_{i1}^t(Q_1^t)=0.8(q_{im}^t)^2+0.8q_{im}^t;f_{i2}^t(Q_2^t)=0.5(q_{ik}^t)^2+0.5q_{ik}^t;$$

$$\hat{g}_{mi}^t(\hat{h}_{mi}^t,q_{im}^t)=(1-\hat{h}_{mi}^t)(q_{im}^t)^2;g_{ij}^t(h_{ij}^t,q_{ij}^t)=(1-h_{ij}^t)(q_{ij}^t)^2;$$

$$g_{ik}^t(h_{ik}^t,q_{ik}^t) = (1-h_{ik}^t)(q_{ik}^t)^2;\hat{e}_{mi}^t(\hat{h}_{mi}^t,q_{im}^t) = (\hat{a}_{mi}^t)^2\hat{h}_{mi}^t q_{im}^t;$$

$$e_{ij}^t(h_{ij}^t,q_{ij}^t) = (a_{ij}^t)^2 h_{ij}^t q_{ij}^t;e_{ik}^t(h_{ik}^t,q_{ik}^t) = (a_{ik}^t)^2 h_{ik}^t q_{ik}^t;$$

$$\hat{r}_{mi}^t(q_{im}^t) = (\hat{b}_{mi}^t)^2(q_{im}^t)^2;r_{ij}^t(q_{ij}^t) = (b_{ij}^t)^2(q_{ij}^t)^2;$$

$$r_{ik}^t(q_{ik}^t) = (b_{ik}^t)^2(q_{ik}^t)^2;c_{ij}^t(d_{ij}^t,q_{ij}^t) = (1-d_{ij}^t)(q_{ij}^t)^2+q_{ij}^t;$$

$$\hat{c}_{mi}^t(\hat{d}_{mi}^t,q_{im}^t) = (1-\hat{d}_{mi}^t)(q_{im}^t)^2+q_{im}^t;$$

$$c_{ik}^t(d_{ik}^t,q_{ik}^t) = (1-d_{ik}^t)(q_{ik}^t)^2+q_{ik}^t$$

(3)消费型企业(甘蔗厂)的函数

$$\hat{c}_{ij}^t(\hat{d}_{ij}^t,q_{ij}^t) = (1-\hat{d}_{ij}^t)(q_{ij}^t)^2+q_{ij}^t;\hat{g}_{ij}^t(\hat{h}_{ij}^t,q_{ij}^t) = (1-\hat{h}_{ij}^t)(q_{ij}^t)^2;$$

$$\hat{e}_{ij}^t(\hat{h}_{ij}^t,q_{ij}^t) = (\hat{a}_{ij}^t)^2\hat{h}_{ij}^t q_{ij}^t;\hat{r}_{ij}^t(q_{ij}^t) = (\hat{b}_{ij}^t)^2(q_{ij}^t)^2;$$

$$s_j^t(\rho_3^t) = 2-\rho_{3j}^t;\alpha_j^t(Q_3^t) = 0.5q_{jk}^t+0.2$$

(4)回收型企业(制糖厂)的函数

$$c_k^t(Q_5^t) = (q_{jk}^t)^2+q_{jk}^t;\hat{c}_{ik}^t(\hat{d}_{ik}^t,q_{ik}^t) = (1-\hat{d}_{ik}^t)(q_{ik}^t)^2+q_{ik}^t;$$

$$\hat{c}_{jk}^t(\hat{d}_{jk}^t,q_{jk}^t) = (1-\hat{d}_{jk}^t)(q_{jk}^t)^2+q_{jk}^t;$$

$$\hat{g}_{ik}^t(\hat{h}_{ik}^t,q_{ik}^t) = (1-\hat{h}_{ik}^t)(q_{ik}^t)^2;\hat{g}_{jk}^t(\hat{h}_{jk}^t,q_{jk}^t) = (1-\hat{h}_{jk}^t)(q_{jk}^t)^2;$$

$$\hat{e}_{ik}^t(\hat{h}_{ik}^t,q_{ik}^t) = (\hat{a}_{ik}^t)^2\hat{h}_{ik}^t q_{ik}^t;\hat{e}_{jk}^t(\hat{h}_{jk}^t,q_{jk}^t) = (\hat{a}_{jk}^t)^2\hat{h}_{jk}^t q_{jk}^t;$$

$$\hat{r}_{ik}^t(q_{ik}^t) = (\hat{b}_{ik}^t)^2(q_{ik}^t)^2;\hat{r}_{jk}^t(q_{jk}^t) = (\hat{b}_{jk}^t)^2(q_{jk}^t)^2$$

4.3 模型参数变动对网络均衡影响的测度与分析

假定交易期数为11,即 $t \in [0,10]$ 且为整数;参考一定标准并结合实际情况,假定 $\hat{\rho}_k^t = 0.05, w_j^t = 0.5, \pi_k^t = 0.8, \hat{\pi}_k^t = 0.2, \beta_{i1}^t = 0.75, \beta_{i2}^t = 0.35, \rho_{ij}^t = 2.5, \rho_{im}^t = 1.25, \rho_{ik}^t = 0.75, \rho_{jk}^t = 0.15$。假定供应型企业(酿酒厂)、生产型企业(化肥厂)、消费型企业(甘蔗厂)、回收型企业(制糖厂)的讨价还价能力均为 d^t、契约履行率均为 h^t、操作技术参数均为 a^t、交易损耗率均为 b^t,在11个交易期内其值从0变化到1。同时,为降低其它因素的干扰,假定当在考查模型的其中一个参数变动时,其它三个参数的数值均为0.5。由于变分不等式在正卦限的可行空间内等价于非线性互补模型,因此在生态工业链的超网络模型的动态均衡条件下,变分不等式的解等价于其非线性互补模型的解。基于此,本文利用 Lingo 9.0 和 Matlab 7.0 对其进行混合编程和模拟求解,分别得到各参数随交易期 t 发生变动对各层企业和整个生态工业链的利润率影响情况,如图5,6,7,8所示。

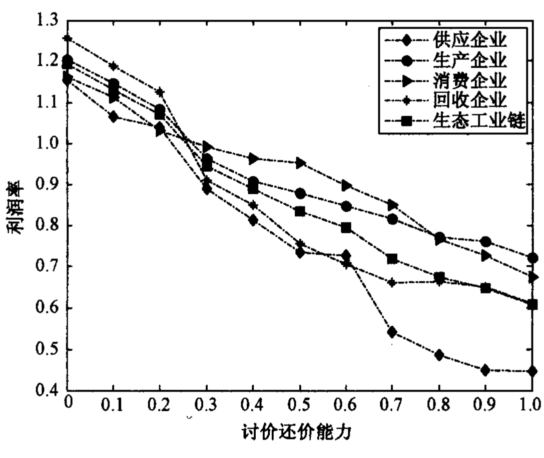

图5　利润率与讨价还价能力的关系

由图5和图8可知,随着讨价还价能力值和交易损耗率

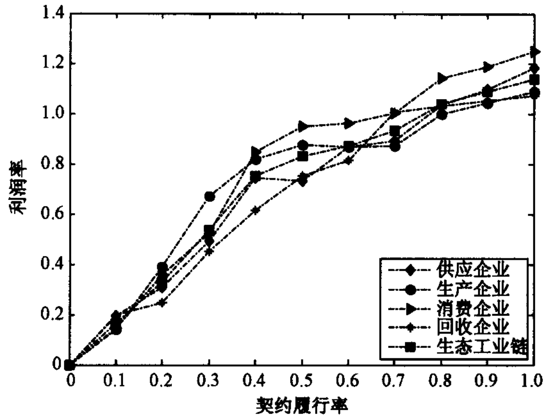

图6　利润率与契约履行率的关系

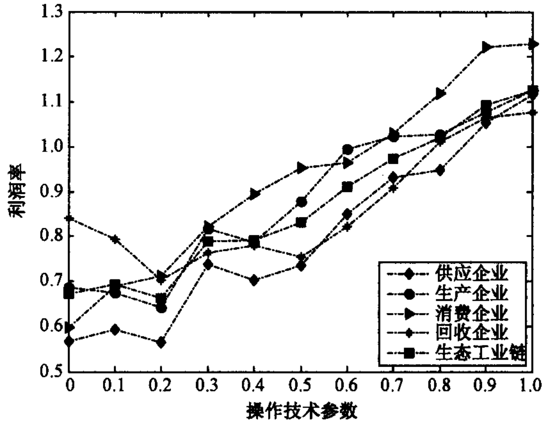

图7　利润率与操作技术的关系

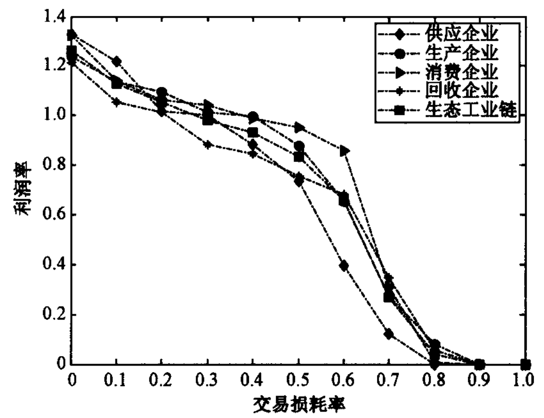

图8　利润率与交易损耗率的关系

的增大,各层企业及生态工业链的利润率均呈现下降趋势。对于讨价还价能力值而言,在不超过0.2时,利润率均大于100%。虽然讨价还价能力值的增大造成各层企业的交易成本减小,但是会引起企业信誉度的下降,影响生态工业链的稳定性,进而导致生态工业链上企业间的合作环境变差,引发不良的社会效益,造成需求量的变动,使得交易量也发生变化,最终导致总成本增加率大于利润增加率。对于交易损耗率而言,其值达到0.9左右时,各利润率降为零,其值小于0.2时,各层企业的环境成本较小,此时各利润率均大于100%。随着交易损耗率的增大,一方面使得环境成本增大,另一方面,各层企业为满足产品的需求,只能增大交易量,从

而大幅度增加了总成本，因此各层企业及生态工业链的利润率必然下降且最终降为零，此时生态工业链的稳定性和工业链的竞争力都将面临严峻的挑战。

由图6和图7可知，随着契约履行率和操作技术参数值的增大，各利润率呈现上升的趋势。对于契约履行率而言，当其值为零时，所有利润率均为零，生态工业链稳定性最差；当其值增大到一定界限（0.7或0.8）时，各利润率将超过100%，生态工业链趋于稳定。契约履行率的增大不仅造成惩罚成本减小，还会提高各层企业获得的操作利润，也会提升企业信誉度，从而促进社会效益的提高，引起需求量和交易量的上升，使得成本增加率低于利润增加率。对于操作技术参数而言，当其值为零时，即各层企业没有自身独有的交易操作技术时，不能获得操作技术利润，因此各利润率较低；当其增大到一定临界值（0.7、0.8、0.9）时，各利润率将达到或超过100%。操作技术参数值的增大一方面引起操作技术利润的增大，另一方面提高了产品的流通速率，从而提升了整个生态工业链的运作效率，产品的及时供应和服务质量的升级可提升各层企业的信誉和社会效益，促使产品的需求量和交易量发生变化，生态工业链的良好稳定性和合作环境致使利润的增加率高于成本的增加率。

5 结论与展望

本文构建了生态工业链的超网络模型，分析了模型的影响因素，运用变分不等式刻画了各层企业的行为和目标，得到了模型的动态均衡条件，并以贵港生态工业园中的复合肥生态工业链为例进行了实证研究。结果表明，各层企业间契约履行率和操作技术参数与各层企业及整个生态工业链的利润率基本呈正比，而讨价还价能力和交易损耗率与各层企业及整个生态工业链的利润率基本呈反比。为此，EIC中的各层企业要努力降低自身的讨价还价能力和交易损耗率，努力增大自身的契约履行率和操作技术水平，推动产业结构的转变和升级，创造和维护良好的信誉和合作环境，以使自身及整个EIC的利润率最大化，维持EIC的稳定和推动社会向"资源节约型，环境友好型"方向健康发展。

事实上，加入时间因素并将超网络和变分不等式理论引入生态工业链的研究不仅可应用于其动态均衡问题，还可将其应用于生态工业共生网络的运作模式、演化机制及治理机制等问题，这均需要下一步进行深入研究。

参考文献

[1] Shi H, Chertow M, Song YY. Developing country experience with eco-industrial parks: a case study of the Tianjin Economic-Technological Development Area in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(3): 191～199.

[2] 王兆华. 生态工业园工业共生网络研究[D]. 大连：大连理工大学，2002.

[3] 马迁利，王兆华，刘海龙. 工业共生视角下钢铁工业生态系统构建[J]. 商业时代，2008，(12)：95～98.

[4] 徐大伟，王子彦，李亚伟. 基于工业代谢的工业生态链梯级循环物质流研究[J]. 环境科学与技术，2005，28(2)：43～45.

[5] Krugman P. Increasing returns and economic geography[J]. Journal of Political Economy, 1991, 99(3): 483～499.

[6] 王众托，王志平. 超网络初探[J]. 管理学报，2008，5(1)：1～8.

[7] Nagurney A, Toyasaki F. Supply chain supernetworks and environmental criteria[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2003, 8(3): 185～213.

[8] 席运江，党延忠. 组织知识系统的知识超网络模型及应用[J]. 管理科学学报，2009，12(3)：12～23.

[9] 于洋，党延忠. 组织人才培养的超网络模型[J]. 系统工程理论与实践，2009，29(4)：154～160.

[10] Bautu E, Kim S, Bautu A, *et al*. Evolving Hypernetwork Models of Binary Time Series for Forecasting Price Movements on Stock Markets[J]. In IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2009, 166～173.

[11] Zhang BT, Kim JK. DNA Hypernetworks for Information Storage and Retrieval[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2006, 4287: 298～307.

[12] 冯蕾，孟令琳. 基于进化博弈论的生态产业链稳定性研究[J]. 科技和产业，2011，11(2)：47～50.

[13] 李春发，李建建，李井锋等. 基于委托代理关系的生态工业链均衡研究[J]. 管理科学，2011，24(3)：101～110.

[14] 徐兵，朱道立. 多用户多准则随机选择下供应链网络均衡模型[J]. 系统工程学报，2008，23(5)：547～553.

[15] 滕春贤，胡引霞，周艳山. 具有随机需求的供应链网络均衡应对突发事件[J]. 系统工程理论与实践，2009，29(3)：16～20.

[16] 席运江，党延忠. 基于加权超网络模型的知识网络鲁棒性分析及应用[J]. 系统工程理论与实践，2007，(4)：134～141.

[17] Nagurney A, Ke K. Financial networks with intermediation: risk management with variable weights[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 172(7): 40～63.

[18] Nagurney A, Ke K. Financial networks with electronic transactions: modeling, analysis, and computations[J]. Quantitative Finance, 2003, 3(2): 71～87.

[19] Dong J, Nagurney A. Bicriteria decision making and financial equilibrium: a variational inequality perspective[J]. Computational Economics, 2001, 17(1): 29～42.

[20] 陈定江. 工业生态系统分析集成与复杂性研究[D]. 北京：清华大学，2003.

[21] 张小雷，张颜颜，唐立新. 钢铁企业煤气混合优化分配模型[J]. 系统工程学报，2011，26(5)：710～717.

[22] Jose M, Nagurney A, Wakolbinger T. Financial engineering of the integration of global supply chain networks and social networks with risk management[J]. Naval Research Logistics, 2006, 53(7): 674～696.

Dynamic Equilibrium of Eco-industrial Chain Based on Supernetwork

WANG Zhi-ying, LI Chun-fa
(School of Management, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: Eco-industrial chain is a complex system composed of multilayer enterprises, having different responsibilities at different layers, and exchanging multi-dimensional resources, such as raw material, information, and technology, with each other. In recent years, supernetwork, an effective tool to describe this kind of complex system with the characteristics of multi-layers, multi-attributes and multi-criteria, has been widely used in supply chain, knowledge management and biological fields. However, supernetwork has been used less in the field of eco-industrial chain. Although there are more and more studies on stability and equilibrium problems of eco-industrial chain, only a few of them have studied these problems from the perspective of supernetwork and variational inequalities. Variational inequalities have been widely used in the field of supply chain, but they mainly focus on solving static equilibrium problems and do not consider dynamic equilibrium problems caused by time factor. However, eco-industrial chain is a system of enterprise alliance that changes over time. In addition, enterprises in the eco-industrial chain have special targets of considering the environmental impact and unique influence factors of changes over time in order to operate stably.

By treating enterprises as nodes, and coopetition relationships among enterprises with same layers as edges, this paper analyzes the operational process of eco-industrial chain and builds supplying enterprise networks, production enterprise networks, consumption enterprise networks, and recycling enterprise networks. These networks are integrated as a supernetwork according to their mapping relationships. Furthermore, the model' s influential factors, including transaction costs, penalty costs, operation technology profits and environmental costs, are analyzed by using economics theory. Dynamic equilibrium condition of the model is obtained and theoretical proof is provided through quantizing these factors. Some basic assumptions are proposed, discrete variable of trading session is introduced, behaviors and targets of enterprises in each layer are depicted with variational inequalities. In addition, optimization models of profit maximization and environmental impact minimization are established by combining the standard weight function and value function. Lingo9. 0 and Matlab7. 0 are used in combination with dynamic equilibrium condition and transformation formula of KKT condition to mix program, simulate and calculate an eco-industrial chain which produces compound fertilizer in Guigang eco-industrial park.

The results show that contract compliance rates and operation technology parameters are positively correlated with profit margins of both enterprises in each layer and eco-industrial chain. However, bargaining power values and loss ratios in trade are just the opposite. The result corresponds with actual problems, and the validity of the model is verified. Therefore, enterprises of each layer in an eco-industrial chain should make efforts to reduce the bargaining power and loss ratios in trade, increase the contract compliance rates and operation technology level, promote the transformation and upgrading of industrial structure, as well as create and maintain the good reputation and cooperation environment. Doing so enables these enterprises to maximize profit margins of their own and the whole eco-industrial chain, maintain the stability of eco-industrial chain and promote the sustainable development of society.

Key words: eco-industrial chain; supernetwork; variational inequalities; dynamic equilibrium

中文编辑：杜　健；英文编辑：Charlie C. Chen