

污染许可证交易制度对闭环供应链网络的影响

杨玉香

(中国计量大学经济与管理学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为促进企业从闭环供应链整体出发正确处理污染排放, 既控制正向供应链污染排放, 又注重减少废旧产品回收再处理过程二次污染排放, 构建多成员企业的闭环供应链网络, 排放多种污染物, 影响多个污染区域, 分析污染许可证交易制度下成员企业守约情形和违约情形时成员企业的均衡条件, 给出变分不等式框架, 构建两种情形下的成员企业博弈模型, 研究污染许可证交易制度对闭环供应链网络的影响, 给出模型的求解算法, 最后提出算例分析网络各成员企业间的博弈关系, 比较不同情形下成员企业所做选择的差异. 发现守约时, 若污染许可证初始分配满足环境目标, 则权威部门指定的环境标准可以达成; 违约时, 建立合理的惩罚框架可保证不出现违约行为.

关键词: 闭环供应链网络; 污染许可证; 成员企业; 博弈模型

中图分类号: F224 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2017)06-0794-14

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2017.06.008

Effect of marketable pollution permits on closed-loop supply chain network

Yang Yuxiang

(College of Economics and Management, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to promote firms dispose proper pollution from the viewpoint of the closed-loop supply chain, both to control pollution emission from forward supply chain, and pay attention to return and reprocessing of end-of-life products, a closed-loop supply chain network including several member firms is developed. Each firm emits multiple pollutants and affects multiple receptor points. With marketable pollution permits, the equilibrium conditions of member firms in the network are analyzed in the cases of compliance and of noncompliance. The variational inequality framework is given. Game models in cases of compliance and non-compliance are developed to study the effect of marketable pollution permits on the closed-loop supply chain network. A algorithm for the model is proposed. Finally, numerical examples are proposed in which the game relationship of member firms is analyzed and the choices of them are compared. It is found that environmental standards imposed by the authorities will be met if the initial license allocation meets the environmental target in the case of compliance and that a penalty scheme can guarantee that there will be no non-compliant.

Key words: closed-loop supply chain network; marketable pollution permits; member firms; game model

1 引言

废旧产品含有大量对生态环境和人类健康具有负作用的物质. 以电子废弃物为例, 其含有大量有毒有害物质, 对生态环境可造成直接污染, 也可间接通过食物链进入人体, 从而影响人类的血液系统和神经系统. 同时, 废旧产

收稿日期: 2014-11-13; 修订日期: 2015-06-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71402173); 教育部人文社会科学研究青年基金资助项目(14YJC630168).

品又含有大量有价值的可回收成分, 对其回收再利用又具有很高的经济价值. 在经济及社会效益驱使下, 我国对废旧产品回收处置工作相当重视, 通过多种方式鼓励回收行为. 2009 年, 国务院办公厅发布了《促进扩大内需鼓励汽车、家电“以旧换新”实施方案》, 在 9 个城市进行试点, 取得了显著成绩. 对于废旧产品回收处理工作, 发达国家普遍采用生产者延伸责任(EPR, extended producer responsibility) 制度, EPR 制度要求生产者除承担传统经济责任外, 还要承担对废弃产品的环境管理责任. 《中华人民共和国循环经济促进法》已初步对此制度进行了阐释和规定, 但还需要进一步完善. 2009 年, 我国颁布了《废弃电器电子产品回收处理管理条例》(简称《条例》), 《条例》鼓励生产者通过各种方式回收废弃电子电器, 同时规定了相关方的责任^[1]. 这些立法对企业的运作模式势必产生重大影响, 由此, 闭环供应链应运而生.

一个完整的闭环供应链既包括传统的正向供应链, 还包括逆向供应链. 众所周知, 正向供应链中的企业在产品生产经营过程中会产生大量对环境具有负面影响的污染排放. 而对于逆向供应链, 在废旧产品的处理过程中, 同样会产生废气、废水、有毒物质及非化学污染排放等对环境不利的物质, 若忽视由此带来的不利影响, 将造成二次环境污染. 以浙江省为例, 浙江台州作为我国最大的废弃电子电器拆解基地之一, 大量家庭作坊式拆解工厂手工拆卸打印机和电脑等产品, 露天焚烧电线电缆, 烤制熔化和酸洗电路板, 随意排放拆解废弃残渣, 已给生态环境和人类健康造成了巨大压力. 一些正规的回收企业也存在二次污染问题, 比如采用火法熔炼的工艺回收贵金属会产生二恶英等有毒废气. 因此, 如何从闭环供应链整体出发减少对环境不利的排放, 既能实现产品的绿色生产, 又能保证废旧产品的无害化、资源化回收处理, 促进我国循环经济的发展, 已成为我国经济发展中亟待解决的重大课题.

大多数学者关注于研究闭环供应链网络设计问题^[2-9]. 关于闭环供应链协调问题的研究成果也很多^[10-16]. 此外, 关于政府激励对闭环供应链的影响问题也非常重视, 郭亚军等考虑政府对制造商的激励作用, 引入政府部门对回收企业的补贴率, 研究闭环供应链协调问题^[17]. 汪翼等^[18]研究制造商责任制和分销商责任制两种回收法律体系对供应链中制造商和分销商的影响, 分析这些回收法律下成员的决策和收益. 关启亮等^[19]考虑第三方回收废旧产品的闭环供应链, 政府设定最低回收率并对制造商的回收进行奖惩, 构建多级闭环供应链模型设计奖惩函数, 分析不同情形下参数变化对回收率和成员企业收益的影响. Atasu 等^[20]研究环境成本和监管成本, 从政府、企业和顾客三方进行利益最大化分析, 并探讨宣传教育及政府补贴等协调方式. Hsuan 等^[21]基于 EPR 制度, 建立博弈模型决策产品回收补偿支付系数和政府补贴率. 王文宾等^[22]考虑政府基于回收率和基于回收量两种奖惩机制, 得到不同情形下闭环供应链定价和回收率, 并比较两种机制的优劣. 杨玉香等^[23]等探讨通过污染税政策来控制废旧产品排放, 实现闭环供应链网络各企业利润最大化. 马卫民等^[24-25]研究我国政府以旧换新补贴政策对闭环供应链的影响, 研究发现政府补贴增加了废旧产品回收量和新产品销量, 即有利于经济增长, 也有利于节能减排. 可见, 以上文献多关注政府补贴对闭环供应链决策的影响, 以及政府奖惩机制设计问题.

为促进企业从闭环供应链出发正确处理污染排放, 避免重视正向排放而轻视逆向排放, 在控制正向供应链污染排放的同时, 也能减少废旧产品回收再处理过程中二次污染排放, 可采取多种方式, 如制定相关法律法规或配套法规标准, 还有经济手段, 其中污染许可证制度是一种有效的措施. 然而, 从现有文献分析发现, 还没有学者关注此制度对闭环供应链网络若干利益相关企业的影响问题. 因此, 本文探讨污染许可证制度下闭环供应链网络成员企业间的博弈行为, 构建守约和违约情形下的博弈模型, 研究此制度对闭环供应链成员企业行为的影响, 为政府制定污染治理手段提供决策依据, 同时为企业在规制下的行为优化提供指导.

2 污染许可证交易制度对网络成员企业的影响分析

2.1 问题描述

考虑包括 $M + N$ 个节点构成的闭环供应链网络, 节点分为两层, 第一层由 M 个生产同质无差异产品的制造/再制造企业(某个特定企业记为 m) 构成, 第二层由 N 个需求区域(某个特定区域记为 n) 构成, 假设再制造产品和新产品无区别. 企业从需求市场回收的废旧产品不可能全部用来再制造, 必然会产生废弃材料, 因此, 企业对这部分废弃材料的废弃处理工作十分重要. 另外, 企业从市场回收废旧产品的多少不仅取决于企业的努力, 也取决于市场上顾客的选择, 对于市场上未被企业回收的废旧产品的处理费用, 由于《条例》中并未强制规定由制造商来负责, 因此, 本文将忽略这部分成本. 在正向供应链方面, 企业在生产新产品过程中会产生大量对环境不利的排放;

在逆向供应链方面,企业从各需求区域回收废旧产品后,要对废旧产品进行拆解处理,对具有再制造价值的部分由再制造企业进行再制造,然而在拆解及其后续处理过程中,往往造成二次污染,对环境及人体健康造成极大压力.在污染许可证制度下,以上排放行为将受到一定程度的限制,企业在每个排放区域必须购得所需数量的许可证才被允许排放.在此制度下,企业可以选择在规定的数额内进行排放,称之为守约,然而,在利益的驱使下,企业也可以拒绝守约,进行超额排放,称之为违约.

模型涉及的符号如下:

x_{mn}^F 为企业 m 销往市场 n 的产品数量;

$\mathbf{x}_m^F$ 为企业 m 运往所有市场的产品数量构成的向量, $\mathbf{x}_m^F \in R_+^N$;

$\mathbf{x}^F$ 为所有企业运往所有市场的产品数量构成的向量, $\mathbf{x}^F \in R_+^{MN}$;

x_{mn}^R 为企业 m 从市场 n 回收的废旧产品数量;

$\mathbf{x}_m^R$ 为企业 m 从所有市场回收产品数量构成的向量, $\mathbf{x}_m^R \in R_+^N$;

$\mathbf{x}^R$ 为所有企业从所有市场回收的产品数量构成的向量, $\mathbf{x}^R \in R_+^{MN}$;

x_m^{New} 为企业 m 生产新产品数量;

$\mathbf{x}^{\text{New}}$ 为所有企业生产的新产品数量构成的向量, $\mathbf{x}^{\text{New}} \in R_+^M$;

μ 为单位废旧产品可再制造比例;

θ 为单位废弃材料的废弃处置成本;

K 为污染区域的数量,每个特定污染区记为 k ;

S 为企业排放污染物的种类,每种特定污染物记为 s ;

e_m^s 为企业 m 排放污染物 s 的数量;

$\mathbf{e}_m$ 为企业 m 各种污染物排放组成的向量, $\mathbf{e}_m \in R_+^S$;

$\mathbf{e}$ 为所有企业的各种污染物排放量组成的向量, $\mathbf{e} \in R_+^{MS}$;

$\mathbf{A}$ 为 $M \times S \times K$ 维扩散矩阵,每个分量 a_{mk}^s 表示企业 m 的每单位排放对污染区 k 处第 s 种污染物平均浓度的贡献^[26];

l_{mk}^s 为企业 m 在污染区 k 处持有污染物 s 的许可证数量;

$\mathbf{l}_m$ 为企业 m 的污染许可证组合构成的向量, $\mathbf{l}_m \in R_+^{SK}$;

$\mathbf{l}$ 为所有企业的所有污染许可证组合构成的向量, $\mathbf{l} \in R_+^{SKM}$;

l_{mk}^{s0} 为权威机构对企业 m 在污染区 k 处关于污染物 s 的污染许可证的初始分配;

$\mathbf{l}_m^0$ 为企业 m 的初始分配组合构成的向量, $\mathbf{l}_m^0 \in R_+^{SK}$;

$\mathbf{l}^0$ 为所有企业的所有初始分配构成的向量, $\mathbf{l}^0 \in R_+^{SKM}$;

p_k^s 为污染区 k 处污染物 s 的许可证价格,所有价格组成向量 $\mathbf{p} \in R_+^{SK}$;

p_{mn}^F 为企业 m 的产品销往市场 n 的价格,所有价格构成向量 $\mathbf{p}^F \in R_+^{MN}$;

p_{mn}^R 为企业 m 从市场 n 回收废旧产品的价格,所有价格构成向量 $\mathbf{p}^R \in R_+^{MN}$;

p_n^D 为市场 n 的需求价格,所有价格构成向量 $\mathbf{p}^D \in R_+^N$;

$f_m = f_m(\mathbf{x}^{\text{New}})$ 为企业 m 生产新产品成本;

$r_m = r_m(\mu, \mathbf{x}_m^R)$ 为企业 m 对回收产品的再制造成本;

$k_{mn}^F = k_{mn}^F(x_{mn}^F)$ 为企业 m 与市场 n 的交易成本;

$k_{mn}^R = k_{mn}^R(x_{mn}^R)$ 为企业 m 从市场 n 回收废旧产品的交易成本;

$g_m = g_m(\mathbf{e}_m, \mathbf{x}_m^{\text{New}}, \mathbf{x}_m^R)$ 为企业 m 为排放的污染物支付的成本.

2.2 守约情形

在守约情形下,成员企业排放的污染物不会多于持有许可证的数量,闭环供应链网络中的成员企业需要考虑新产品的生产成本、与需求市场的交易成本、废旧产品的回收成本、废旧产品的再制造成本、废弃处置

成本、减排成本以及购买污染许可证成本. 设 p_{mn}^{F*} 和 p_{mn}^{R*} 分别为价格 p_{mn}^F 和 p_{mn}^R 的均衡值, 均为内生变量. 设企业 m 的利润记为 u_m^1 , 假设每个企业都以利润最大化为目标, 则企业 m 的决策问题可表示为

$$\begin{aligned} \text{Max } u_m^1 = u_m^1(\mathbf{x}^{\text{New}}, x_m^F, x_m^R, \mathbf{e}_m, \mathbf{l}_m) = & \sum_{n=1}^N p_{mn}^{F*} x_{mn}^F - \sum_{n=1}^N p_{mn}^{R*} x_{mn}^R - f_m(\mathbf{x}^{\text{New}}) - \\ & r_m(\mu, x_m^R) - \sum_{n=1}^N k_{mn}^F(x_{mn}^F) - \sum_{n=1}^N k_{mn}^R(x_{mn}^R) - \theta(1-\mu) \sum_{n=1}^N x_{mn}^R - \\ & g_m(\mathbf{e}_m, x_m^{\text{New}}, x_m^R) - \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K p_k^s (l_{mk}^s - l_{mk}^0), \end{aligned} \quad (1)$$

s.t.

$$a_{mk}^s e_m^s \leq l_{mk}^s, \forall k, s, \quad (2)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{mn}^F \leq x_m^{\text{New}} + \mu \sum_{n=1}^N x_{mn}^R, \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{mn}^R \leq \sum_{n=1}^N x_{mn}^F, \quad (4)$$

$$x_m^{\text{New}} \geq 0, x_{mn}^F \geq 0, x_{mn}^R \geq 0, e_m^s \geq 0, l_{mk}^s \geq 0, \forall m, n, s, k. \quad (5)$$

式(1)表示企业 m 的利润; 式(2)表示企业 m 在每个区域 k 每种污染物 s 的排放约束; 式(3)表示企业 m 与需求市场总交易量不大于新产品和再制造产品总产量; 式(4)为企业 m 废旧产品回收量限制; 式(5)为变量非负约束.

假设利润函数 u_m^1 为连续可微凸函数, 闭环供应链网络中的各企业间为非合作竞争关系, 故存在 Nash-Cournot 均衡. 因此, 所有企业同时最优条件可表示成如下变分不等式问题, 即求解 $(\mathbf{x}^{\text{New}*}, \mathbf{x}^{F*}, \mathbf{x}^{R*}, \mathbf{e}^*, \mathbf{l}^*, \gamma_1^*, \gamma_2^*, \gamma_3^*) \in R_+^{3M+2MN+MS+2MSK}$ 满足下式, 即

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M \left(\frac{\partial f_m(\mathbf{x}^{\text{New}*})}{\partial x_m^{\text{New}}} + \frac{\partial g_m(\mathbf{e}_m^*, x_m^{\text{New}*}, x_m^{R*})}{\partial x_m^{\text{New}}} - \gamma_{2m}^* \right) (x_m^{\text{New}} - x_m^{\text{New}*}) + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(-p_{mn}^{F*} + \frac{\partial k_{mn}^F(x_{mn}^{F*})}{\partial x_{mn}^F} + \gamma_{2m}^* - \gamma_{3m}^* \right) (x_{mn}^F - x_{mn}^{F*}) + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(p_{mn}^{R*} + \frac{\partial r_m(\mu, x_m^{R*})}{\partial x_{mn}^R} + \frac{\partial g_m(\mathbf{e}_m^*, x_m^{\text{New}*}, x_m^{R*})}{\partial x_{mn}^R} + \frac{\partial k_{mn}^R(x_{mn}^{R*})}{\partial x_{mn}^R} + \theta(1-\mu) - \mu\gamma_{2m}^* + \gamma_{3m}^* \right) \cdot \\ & (x_{mn}^R - x_{mn}^{R*}) + \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S \left(\frac{\partial g_m(\mathbf{e}_m^*, x_m^{\text{New}*}, x_m^{R*})}{\partial e_m^s} + \sum_{k=1}^K a_{mk}^s \gamma_{1mk}^{s*} \right) (e_m^s - e_m^{s*}) + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S (p_k^{s*} - \gamma_{1mk}^{s*}) (l_{mk}^s - l_{mk}^{s*}) + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S (l_{mk}^{s*} - a_{mk}^s e_m^{s*}) (\gamma_{1mk}^s - \gamma_{1mk}^{s*}) + \\ & \sum_{m=1}^M \left(x_m^{\text{New}*} + \mu \sum_{n=1}^N x_{mn}^{R*} - \sum_{n=1}^N x_{mn}^{F*} \right) (\gamma_{2m} - \gamma_{2m}^*) + \sum_{m=1}^M \left(\sum_{n=1}^N x_{mn}^{F*} - \sum_{n=1}^N x_{mn}^{R*} \right) (\gamma_{3m} - \gamma_{3m}^*) \geq 0, \\ & \forall (\mathbf{x}^{\text{New}}, \mathbf{x}^F, \mathbf{x}^R, \mathbf{e}, \mathbf{l}, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) \in R_+^{3M+2MN+MS+2MSK}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\gamma_1 = (\gamma_{111}^1, \gamma_{112}^1, \dots, \gamma_{1mk}^s, \dots, \gamma_{1MK}^S)^T$, $\gamma_2 = (\gamma_{21}, \gamma_{22}, \dots, \gamma_{2m}, \dots, \gamma_{2M})^T$, $\gamma_3 = (\gamma_{31}, \gamma_{32}, \dots, \gamma_{3m}, \dots, \gamma_{3M})^T$ 分别为式(2)、式(3)和式(4)的 Lagrange 乘子.

2.3 违约情形

考虑成员企业可能违约, 环境部门为控制污染, 应制定一定的惩罚措施以限制企业的违约行为. 因此, 相

对于污染许可证的允许数量, 设 ε_{mk}^{s+} 表示企业 m 在污染区域 k 处污染物 s 的排放超出量, 企业 m 在各区域所有污染物排放超出量构成向量 $\varepsilon_m^+ \in R_+^{KS}$, 所有企业的超出量构成向量 $\varepsilon^+ \in R_+^{MKS}$; 设 ε_{mk}^{s-} 表示企业 m 在污染区域 k 处污染物 s 的排放剩余量, 企业 m 的所有排放剩余量构成向量 $\varepsilon_m^- \in R_+^{KS}$, 所有企业的剩余量构成向量 $\varepsilon^- \in R_+^{MKS}$. 在违约情形下, 企业除了涉及守约情形下的成本外, 还要支付违约成本. 设企业 m 若有违约行为, 则在污染区域 k 每单位污染物 s 排放超出量将被处罚 λ_{mk}^s , 且 $\lambda_{mk}^s \geq 0$. 因此, 企业 m 支付违约成本为

$$\sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K \lambda_{mk}^s \varepsilon_{mk}^{s+}. \quad (7)$$

将违约情形下企业 m 的利润记为 u_m^2 , 企业仍以利润最大化为目标, 则企业 m 的决策问题转变为

$$\begin{aligned} \text{Max } u_m^2 = & u_m^2(\mathbf{x}^{\text{New}}, x_m^{\text{F}}, x_m^{\text{R}}, \mathbf{e}_m, \mathbf{l}_m, \varepsilon_m^+, \varepsilon_m^-) = \sum_{n=1}^N p_{mn}^{\text{F}*} x_{mn}^{\text{F}} - \sum_{n=1}^N p_{mn}^{\text{R}*} x_{mn}^{\text{R}} - f_m(\mathbf{x}^{\text{New}}) - \\ & r_m(\mu, x_m^{\text{R}}) - \sum_{n=1}^N k_{mn}^{\text{F}}(x_{mn}^{\text{F}}) - \sum_{n=1}^N k_{mn}^{\text{R}}(x_{mn}^{\text{R}}) - \theta(1-\mu) \sum_{n=1}^N x_{mn}^{\text{R}} - g_m(\mathbf{e}_m, x_m^{\text{New}}, x_m^{\text{R}}) - \\ & \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K p_k^s (l_{mk}^s - l_{mk}^{s0}) - \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K \lambda_{mk}^s \varepsilon_{mk}^{s+}, \end{aligned} \quad (8)$$

s.t.

$$a_{mk}^s e_m^s + \varepsilon_{mk}^{s-} - \varepsilon_{mk}^{s+} = l_{mk}^s, \forall k, s, \quad (9)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{mn}^{\text{F}} \leq x_m^{\text{New}} + \mu \sum_{n=1}^N x_{mn}^{\text{R}}, \quad (10)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{mn}^{\text{R}} \leq \sum_{n=1}^N x_{mn}^{\text{F}}, \quad (11)$$

$$x_m^{\text{New}} \geq 0, x_{mn}^{\text{F}} \geq 0, x_{mn}^{\text{R}} \geq 0, e_m^s \geq 0, l_{mk}^s \geq 0, \varepsilon_{mk}^{s+} \geq 0, \varepsilon_{mk}^{s-} \geq 0, \forall m, n, s, k. \quad (12)$$

假设利润函数 u_m^2 为连续可微凸函数, 则所有企业同时最优条件可表示成如下变分不等式问题: 求解 $(\mathbf{x}^{\text{New}*}, \mathbf{x}^{\text{F}*}, \mathbf{x}^{\text{R}*}, \mathbf{e}^*, \mathbf{l}^*, \varepsilon^{+*}, \varepsilon^{-*}, \gamma_1^*, \gamma_2^*, \gamma_3^* \in R_+^{3M+2MN+MS+4MSK})$ 满足下式, 即

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M \left(\frac{\partial f_m(\mathbf{x}^{\text{New}*})}{\partial x_m^{\text{New}}} + \frac{\partial g_m(\mathbf{e}_m^*, x_m^{\text{New}*}, x_m^{\text{R}*})}{\partial x_m^{\text{New}}} - \gamma_{2m}^* \right) (x_m^{\text{New}} - x_m^{\text{New}*}) + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(-p_{mn}^{\text{F}*} + \frac{\partial k_{mn}^{\text{F}}(x_{mn}^{\text{F}*})}{\partial x_{mn}^{\text{F}}} + \gamma_{2m}^* - \gamma_{3m}^* \right) (x_{mn}^{\text{F}} - x_{mn}^{\text{F}*}) + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(p_{mn}^{\text{R}*} + \frac{\partial r_m(\mu, x_m^{\text{R}*})}{\partial x_{mn}^{\text{R}}} + \frac{\partial g_m(\mathbf{e}_m^*, x_m^{\text{New}*}, x_m^{\text{R}*})}{\partial x_{mn}^{\text{R}}} + \frac{\partial k_{mn}^{\text{R}}(x_{mn}^{\text{R}*})}{\partial x_{mn}^{\text{R}}} + \right. \\ & \quad \left. \theta(1-\mu) - \mu\gamma_{2m}^* + \gamma_{3m}^* \right) (x_{mn}^{\text{R}} - x_{mn}^{\text{R}*}) + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S \left(\frac{\partial g_m(\mathbf{e}_m^*, x_m^{\text{New}*}, x_m^{\text{R}*})}{\partial e_m^s} + \sum_{k=1}^K a_{mk}^s \gamma_{1mk}^* \right) (e_m^s - e_m^{s*}) + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S (p_k^{s*} - \gamma_{1mk}^{s*}) (l_{mk}^s - l_{mk}^{s*}) + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S (\lambda_{mk}^s - \gamma_{1mk}^{s*}) (\varepsilon_{mk}^{s+} - \varepsilon_{mk}^{s+*}) + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S (\gamma_{1mk}^{s*}) (\varepsilon_{mk}^{s-} - \varepsilon_{mk}^{s-*}) + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S (l_{mk}^{s*} - a_{mk}^s e_m^{s*} - \varepsilon_{mk}^{s-*} + \varepsilon_{mk}^{s+*}). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (\gamma_{1mk}^s - \gamma_{1mk}^{s*}) + \sum_{m=1}^M \left(x_m^{\text{New}*} + \mu \sum_{n=1}^N x_{mn}^{\text{R}*} - \sum_{n=1}^N x_{mn}^{\text{F}*} \right) (\gamma_{2m} - \gamma_{2m}^*) + \\
& \sum_{m=1}^M \left(\sum_{n=1}^N x_{mn}^{\text{F}*} - \sum_{n=1}^N x_{mn}^{\text{R}*} \right) (\gamma_{3m} - \gamma_{3m}^*) \geq 0, \\
& \forall (\mathbf{x}^{\text{New}}, \mathbf{x}^{\text{F}}, \mathbf{x}^{\text{R}}, \mathbf{e}, \mathbf{l}, \boldsymbol{\varepsilon}^+, \boldsymbol{\varepsilon}^-, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) \in R_+^{3M+2MN+MS+4MSK}.
\end{aligned} \quad (13)$$

2.4 需求市场的均衡条件

设需求市场 n 的需求为连续函数 D_n , 且 $D_n = D_n(\mathbf{p}^{\text{D}})$, 设 τ_n 表示需求市场 n 顾客的偏好函数, $\tau_n = \tau_n(\mathbf{x}^{\text{R}})$, 需求市场 n 的均衡条件为

$$\begin{cases} p_{mn}^{\text{F}*} = p_n^{\text{D}*}, & \text{若 } x_{mn}^{\text{F}*} > 0 \\ p_{mn}^{\text{F}*} \geq p_n^{\text{D}*}, & \text{若 } x_{mn}^{\text{F}*} = 0, \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} D_n(\mathbf{p}^{\text{D}*}) = \sum_{m=1}^M x_{mn}^{\text{F}*}, & \text{若 } p_n^{\text{D}*} > 0 \\ D_n(\mathbf{p}^{\text{D}*}) \leq \sum_{m=1}^M x_{mn}^{\text{F}*}, & \text{若 } p_n^{\text{D}*} = 0, \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \tau_n(\mathbf{x}^{\text{R}*}) = p_{mn}^{\text{R}*}, & \text{若 } x_{mn}^{\text{R}*} > 0 \\ \tau_n(\mathbf{x}^{\text{R}*}) \geq p_{mn}^{\text{R}*}, & \text{若 } x_{mn}^{\text{R}*} = 0. \end{cases} \quad (16)$$

对于每个需求市场, 企业可以回收的废旧产品总量不会超过此市场的产品总输入量, 即

$$\sum_{m=1}^M x_{mn}^{\text{R}} \leq \sum_{m=1}^M x_{mn}^{\text{F}}. \quad (17)$$

均衡状态下每个市场都必须满足式(14)~式(17), 这些条件可表述为如下的变分不等式问题, 求解 $(\mathbf{x}^{\text{F}*}, \mathbf{x}^{\text{R}*}, \mathbf{p}^{\text{D}*}, \gamma_4^*) \in R_+^{2MN+2N}$, 使其满足下式, 即

$$\begin{aligned}
& \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (p_{mn}^{\text{F}*} - p_n^{\text{D}*} - \gamma_{4n}^*) (x_{mn}^{\text{F}} - x_{mn}^{\text{F}*}) + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (\tau_n(\mathbf{x}^{\text{R}*}) - p_{mn}^{\text{R}*} + \gamma_{4n}^*) (x_{mn}^{\text{R}} - x_{mn}^{\text{R}*}) + \\
& \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^M x_{mn}^{\text{F}*} - D_n(\mathbf{p}^{\text{D}*}) \right) (p_n^{\text{D}} - p_n^{\text{D}*}) + \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^M x_{mn}^{\text{F}*} - \sum_{m=1}^M x_{mn}^{\text{R}*} \right) (\gamma_{4n} - \gamma_{4n}^*) \geq 0, \\
& \forall (\mathbf{x}^{\text{F}}, \mathbf{x}^{\text{R}}, \mathbf{p}^{\text{D}}, \gamma_4) \in R_+^{2MN+2N},
\end{aligned} \quad (18)$$

其中 $\gamma_4 = (\gamma_{41}, \gamma_{42}, \dots, \gamma_{4N})^{\text{T}}$ 为与约束(17)相关的 Lagrange 乘子.

2.5 污染许可证市场出清条件

均衡状态下, 若某个污染区域关于某种污染物的许可证价格为正, 则在此处污染许可证市场必然出清; 若在某污染区域某一特定污染物许可证供应过剩, 则在此处关于此种污染物的许可证价格必然为零. 因此, 控制污染许可证市场出清的经济系统条件描述成: 对每一污染物 s 和每一污染区域 k 满足下式.

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^M (l_{mk}^{s0} - l_{mk}^{s*}) = 0, & \text{若 } p_k^{s*} > 0 \\ \sum_{m=1}^M (l_{mk}^{s0} - l_{mk}^{s*}) \geq 0, & \text{若 } p_k^{s*} = 0. \end{cases} \quad (19)$$

上述条件等价于如下变分不等式问题, 求解 $(\mathbf{p}^*) \in R_+^{KS}$, 使其满足下式, 即

$$\sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S \left(\sum_{m=1}^M (l_{mk}^{s0} - l_{mk}^{s*}) \right) (p_k^s - p_k^{s*}) \geq 0, \forall (\mathbf{p}) \in R_+^{KS}.$$

3 守约及违约情形下博弈模型的构建及求解

3.1 守约情形下的博弈模型

定义 1 守约情形下, 污染许可证交易制度下闭环供应链网络均衡是网络间产品交易量和交易价格、污染许可证数量和交易价格、污染排放量满足式(6)、式(8)和式(20)的和。

定理 1 守约情形下, 污染许可证交易制度下闭环供应链网络均衡时关于网络间产品交易量和交易价格、污染许可证数量和交易价格、污染排放量的解, 等价于下列变分不等式问题的解, 即求解 $(\mathbf{x}^{\text{New}*}, \mathbf{x}^{\text{F}*}, \mathbf{x}^{\text{R}*}, \mathbf{p}^*, \mathbf{p}^{\text{D}*}, \mathbf{e}^*, \mathbf{l}^*, \gamma_1^*, \gamma_2^*, \gamma_3^*, \gamma_4^*) \in R_+^{3M+2MN+MS+2MSK+2N+KS}$ 满足下式, 即

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M \left(\frac{\partial f_m(\mathbf{x}^{\text{New}*})}{\partial x_m^{\text{New}}} + \frac{\partial g_m(\mathbf{e}_m^*, x_m^{\text{New}*}, x_m^{\text{R}*})}{\partial x_m^{\text{New}}} - \gamma_{2m}^* \right) (x_m^{\text{New}} - x_m^{\text{New}*}) + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial k_{mn}^{\text{F}}(x_{mn}^{\text{F}*})}{\partial x_{mn}^{\text{F}}} + \gamma_{2m}^* - \gamma_{3m}^* - p_n^{\text{D}*} - \gamma_{4n}^* \right) (x_{mn}^{\text{F}} - x_{mn}^{\text{F}*}) + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial r_m(\mu, x_m^{\text{R}*})}{\partial x_{mn}^{\text{R}}} + \frac{\partial g_m(\mathbf{e}_m^*, x_m^{\text{New}*}, x_m^{\text{R}*})}{\partial x_{mn}^{\text{R}}} + \frac{\partial k_{mn}^{\text{R}}(x_{mn}^{\text{R}*})}{\partial x_{mn}^{\text{R}}} + \theta(1 - \mu) - \right. \\ & \quad \left. \mu \gamma_{2m}^* + \gamma_{3m}^* + \tau_n(x^{\text{R}*}) + \gamma_{4n}^* \right) (x_{mn}^{\text{R}} - x_{mn}^{\text{R}*}) + \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S \left(\sum_{m=1}^M (l_{mk}^{s0} - l_{mk}^{s*}) \right) (p_k^s - p_k^{s*}) + \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^M x_{mn}^{\text{F}*} - D_n(p^{\text{D}*}) \right) (p_n^{\text{D}} - p_n^{\text{D}*}) + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S \left(\frac{\partial g_m(\mathbf{e}_m^*, x_m^{\text{New}*}, x_m^{\text{R}*})}{\partial e_m^s} + \sum_{k=1}^K a_{mk}^s \gamma_{1mk}^{s*} \right) (e_m^s - e_m^{s*}) + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S (p_k^{s*} - \gamma_{1mk}^{s*}) \cdot \\ & \quad (l_{mk}^{s0} - l_{mk}^{s*}) + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S (l_{mk}^{s*} - a_{mk}^s e_m^{s*}) (\gamma_{1mk}^s - \gamma_{1mk}^{s*}) + \\ & \sum_{m=1}^M \left(x_m^{\text{New}*} + \mu \sum_{n=1}^N x_{mn}^{\text{R}*} - \sum_{n=1}^N x_{mn}^{\text{F}*} \right) (\gamma_{2m} - \gamma_{2m}^*) + \sum_{m=1}^M \left(\sum_{n=1}^N x_{mn}^{\text{F}*} - \sum_{n=1}^N x_{mn}^{\text{R}*} \right) \cdot \\ & \quad (\gamma_{3m} - \gamma_{3m}^*) + \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^M x_{mn}^{\text{F}*} - \sum_{m=1}^M x_{mn}^{\text{R}*} \right) (\gamma_{4n} - \gamma_{4n}^*) \geq 0, \\ & \forall (\mathbf{x}^{\text{New}}, \mathbf{x}^{\text{F}}, \mathbf{x}^{\text{R}}, \mathbf{p}, \mathbf{p}^{\text{D}}, \mathbf{e}, \mathbf{l}, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4) \in R_+^{3M+2MN+MS+2MSK+2N+KS}. \end{aligned} \quad (20)$$

证明 首先证明必要性, 将均衡条件式(6)、式(18)和式(20)相加并简单处理后, 即可得到变分不等式(21)。其次证明充分性, 分别在式(21)的第二个乘号和第三个乘号前的括号内加入 $-p_{mn}^{\text{F}*} + p_{mn}^{\text{F}*}$ 和 $p_{mn}^{\text{R}*} - p_{mn}^{\text{R}*}$, 这样调整后仍然等于式(21), 且正好是式(6)、式(18)和式(20)的和。证毕。

3.2 违约情形下的博弈模型

定义 2 违约情形下, 污染许可证交易制度下闭环供应链网络均衡是网络间产品交易量和交易价格、污染许可证数量和交易价格及其超出量和剩余量、污染排放量满足式(13)、式(18)和式(20)的和。

定理 2 违约情形污染许可证交易制度下闭环供应链网络均衡时关于网络间产品交易量和交易价

格、污染许可证数量和交易价格及其超出量和剩余量、污染排放量的解, 等价于下列变分不等式问题的解, 求解 $(\mathbf{x}^{\text{New*}}, \mathbf{x}^{\text{F*}}, \mathbf{x}^{\text{R*}}, \mathbf{p}^*, \mathbf{p}^{\text{D*}}, \mathbf{e}^*, \mathbf{l}^*, \boldsymbol{\varepsilon}^{+*}, \boldsymbol{\varepsilon}^{-*}, \boldsymbol{\gamma}_1^*, \boldsymbol{\gamma}_2^*, \boldsymbol{\gamma}_3^*, \boldsymbol{\gamma}_4^*) \in R_+^{3M+2MN+MS+4MSK+2N+KS}$ 满足下式, 即

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M \left(\frac{\partial f_m(\mathbf{x}^{\text{New*}})}{\partial x_m^{\text{New}}} + \frac{\partial g_m(\mathbf{e}_m^*, x_m^{\text{New*}}, x_m^{\text{R*}})}{\partial x_m^{\text{New}}} - \gamma_{2m}^* \right) (x_m^{\text{New}} - x_m^{\text{New*}}) + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial k_{mn}^{\text{F}}(x_{mn}^{\text{F*}})}{\partial x_{mn}^{\text{F}}} + \gamma_{2m}^* - \gamma_{3m}^* - p_n^{\text{D*}} - \gamma_{4n}^* \right) (x_{mn}^{\text{F}} - x_{mn}^{\text{F*}}) + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial r_m(\mu, x_m^{\text{R*}})}{\partial x_{mn}^{\text{R}}} + \frac{\partial g_m(\mathbf{e}_m^*, x_m^{\text{New*}}, x_m^{\text{R*}})}{\partial x_{mn}^{\text{R}}} + \frac{\partial k_{mn}^{\text{R}}(x_{mn}^{\text{R*}})}{\partial x_{mn}^{\text{R}}} + \theta(1 - \mu) - \right. \\ & \quad \left. \mu \gamma_{2m}^* + \gamma_{3m}^* + \tau_n(x^{\text{R*}}) + \gamma_{4n}^* \right) (x_{mn}^{\text{R}} - x_{mn}^{\text{R*}}) + \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S \left(\sum_{m=1}^M (l_{mk}^{s0} - l_{mk}^{s*}) \right) (p_k^s - p_k^{s*}) + \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^M x_{mn}^{\text{F*}} - D_n(p^{\text{D*}}) \right) (p_n^{\text{D}} - p_n^{\text{D*}}) + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S \left(\frac{\partial g_m(\mathbf{e}_m^*, x_m^{\text{New*}}, x_m^{\text{R*}})}{\partial e_m^s} + \sum_{k=1}^K a_{mk}^s \gamma_{1mk}^{s*} \right) (e_m^s - e_m^{s*}) + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S (p_k^{s*} - \gamma_{1mk}^{s*}) (l_{mk}^s - l_{mk}^{s*}) + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S (\lambda_{mk}^s - \gamma_{1mk}^{s*}) (\varepsilon_{mk}^{s+} - \varepsilon_{mk}^{s+*}) + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S \gamma_{1mk}^{s*} (\varepsilon_{mk}^{s-} - \varepsilon_{mk}^{s-*}) + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S (l_{mk}^{s*} - a_{mk}^s e_m^{s*} - \varepsilon_{mk}^{s-*} + \varepsilon_{mk}^{s+*}) \cdot \\ & \quad (\gamma_{1mk}^s - \gamma_{1mk}^{s*}) + \sum_{m=1}^M \left(x_m^{\text{New*}} + \mu \sum_{n=1}^N x_{mn}^{\text{R*}} - \sum_{n=1}^N x_{mn}^{\text{F*}} \right) (\gamma_{2m} - \gamma_{2m}^*) + \\ & \sum_{m=1}^M \left(\sum_{n=1}^N x_{mn}^{\text{F*}} - \sum_{n=1}^N x_{mn}^{\text{R*}} \right) (\gamma_{3m} - \gamma_{3m}^*) + \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^M x_{mn}^{\text{F*}} - \sum_{m=1}^M x_{mn}^{\text{R*}} \right) [\gamma_{4n} - \gamma_{4n}^*] \geq 0, \\ & \forall (\mathbf{x}^{\text{New}}, \mathbf{x}^{\text{F}}, \mathbf{x}^{\text{R}}, \mathbf{p}, \mathbf{p}^{\text{D}}, \mathbf{e}, \mathbf{l}, \boldsymbol{\varepsilon}^+, \boldsymbol{\varepsilon}^-, \boldsymbol{\gamma}_1, \boldsymbol{\gamma}_2, \boldsymbol{\gamma}_3, \boldsymbol{\gamma}_4) \in R_+^{3M+2MN+MS+4MSK+2N+KS}. \end{aligned} \quad (21)$$

证明 略.

3.3 网络间交易价格的求解

对于内生价格变量 p_{mn}^{F} , 可分别通过设置变分不等式(6)或式(13)的第二项, 或变分不等式(18)的第一项为零, 从而求得

$$p_{mn}^{\text{F*}} = \frac{\partial k_{mn}^{\text{F}}(x_{mn}^{\text{F*}})}{\partial x_{mn}^{\text{F}}} + \gamma_{2m}^* - \gamma_{3m}^*, \quad (22)$$

或

$$p_{mn}^{\text{F*}} = p_n^{\text{D*}} + \gamma_{4n}^*. \quad (23)$$

对于内生价格变量 p_{mn}^{R} , 可分别通过设置变分不等式(6)或式(13)的第三项, 或变分不等式(18)的第二项为零, 从而求得

$$p_{mn}^{\text{R*}} = -\frac{\partial r_m(\mu, x_m^{\text{R*}})}{\partial x_{mn}^{\text{R}}} - \frac{\partial g_m(\mathbf{e}_m^*, x_m^{\text{New*}}, x_m^{\text{R*}})}{\partial x_{mn}^{\text{R}}} - \frac{\partial k_{mn}^{\text{R}}(x_{mn}^{\text{R*}})}{\partial x_{mn}^{\text{R}}} - \theta(1 - \mu) + \mu \gamma_{2m}^* - \gamma_{3m}^*, \quad (24)$$

或

$$p_{mn}^{\text{R*}} = \tau_n(x^{\text{R*}}) + \gamma_{4n}^*. \quad (25)$$

3.4 模型求解

对于模型(21)和模型(22), 应用修正投影算法进行求解. 对于模型(21) 可以通过如下标准变分不等式形式表示, 即求解 $\mathbf{Z}^* \in H$, 使得

$$\langle \mathbf{F}(\mathbf{Z}^*), \mathbf{Z} - \mathbf{Z}^* \rangle \geq 0, \forall \mathbf{Z} \in H, \quad (26)$$

其中 $\mathbf{Z} \equiv (\mathbf{x}^{\text{New}}, \mathbf{x}^{\text{F}}, \mathbf{x}^{\text{R}}, \mathbf{p}, \mathbf{p}^{\text{D}}, \mathbf{e}, \mathbf{l}, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4) \in H$, $H \equiv \{\mathbf{Z} | \mathbf{Z} \in R_+^{3M+2MN+MS+2MSK+2N+KS}\}$, $\mathbf{F}(\mathbf{Z}) \equiv (F_{1m}, F_{2mn}, F_{3mn}, F_{4ks}, F_{5n}, F_{6ms}, F_{7mks}, F_{8mks}, F_{9m}, F_{10m}, F_{11n})^T$. $\mathbf{F}(\mathbf{Z})$ 各个分量分别为式(21)中各乘号前面部分构成的函数, 符号 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示 N 维欧式空间的内积.

以模型(21)为例给出具体求解算法, 实现如下:

步骤 1 初始化. $I \leftarrow 1$, 设置步长 δ 满足 $0 < \delta \leq 1/L$, L 为 Lipschitz 常数, 设置 $\psi > 0$ 及初始值 $\mathbf{Z}^0 \in H$;

步骤 2 通过下列变分不等式问题求解 $\bar{\mathbf{Z}}^I$, 即

$$\langle (\bar{\mathbf{Z}}^I + \delta \mathbf{F}(\mathbf{Z}^{I-1}) - \mathbf{Z}^{I-1})^T, \mathbf{Z} - \bar{\mathbf{Z}}^I \rangle \geq 0, \forall \mathbf{Z} \in H; \quad (27)$$

步骤 3 通过下列变分不等式问题求解 $\mathbf{Z}^I$, 即

$$\langle (\mathbf{Z}^I + \delta \mathbf{F}(\bar{\mathbf{Z}}^I) - \mathbf{Z}^{I-1})^T, \mathbf{Z} - \mathbf{Z}^I \rangle \geq 0, \forall \mathbf{Z} \in H; \quad (28)$$

步骤 4 若 $\max_j \|\mathbf{Z}_j^I - \mathbf{Z}_j^{I-1}\| \leq \psi$, 则停止循环, 否则, $I \leftarrow I + 1$, 返回步骤 2.

4 算 例

利用提出的修正投影算法, 编写基于 MATLAB 的应用程序, 设置收敛标准 $\psi = 10^{-4}$, 参数 $\delta = 0.05$, 分别求解守约情形下的模型(21) 和违约情形下的模型(22), 并对两种情形下的模型均衡结果进行对比, 分析闭环供应链网络各成员企业间的博弈关系, 比较不同情形下成员企业所做选择的差异.

考虑包括两个企业(分别记为 M1 和 M2)和两个需求市场(分别记为 D1 和 D2)的闭环供应链网络, 每个企业排放两种污染物(分别记为 S1 和 S2), 污染物会影响两个区域(分别记为 K1 和 K2). 使用的相关成本函数及参数设置如下

$$f_1(\mathbf{x}^{\text{New}}) = 2.5(x_1^{\text{New}})^2 + x_1^{\text{New}}x_2^{\text{New}} + x_1^{\text{New}}, \quad f_2(\mathbf{x}^{\text{New}}) = 2(x_2^{\text{New}})^2 + x_1^{\text{New}}x_2^{\text{New}} + 5x_2^{\text{New}},$$

$$r_1(\mu, \mathbf{x}_1^{\text{R}}) = 0.6\mu^2[(x_{11}^{\text{R}})^2 + x_{11}^{\text{R}}x_{12}^{\text{R}} + (x_{12}^{\text{R}})^2], \quad r_2(\mu, \mathbf{x}_2^{\text{R}}) = \mu^2[0.5(x_{21}^{\text{R}})^2 + x_{21}^{\text{R}}x_{22}^{\text{R}} + (x_{22}^{\text{R}})^2],$$

$$k_{mn}^{\text{F}}(x_{mn}^{\text{F}}) = 0.2(x_{mn}^{\text{F}})^2, \quad k_{mn}^{\text{R}}(x_{mn}^{\text{R}}) = 0.1(x_{mn}^{\text{R}})^2,$$

$$g_1(\mathbf{e}_1, x_1^{\text{New}}, \mathbf{x}_1^{\text{R}}) = (e_1^1)^2 - 4e_1^1 + 0.5(e_1^2)^2 - 10e_1^2 + 2x_1^{\text{New}} + 3 \sum_{n=1}^2 x_{1n}^{\text{R}},$$

$$g_2(\mathbf{e}_2, x_2^{\text{New}}, \mathbf{x}_2^{\text{R}}) = 0.7(e_2^1)^2 - 10e_2^1 + (e_2^2)^2 - 8e_2^2 + 3x_2^{\text{New}} + 5 \sum_{n=1}^2 x_{2n}^{\text{R}},$$

$$D_1(\mathbf{p}^{\text{D}}) = -2p_1^{\text{D}} - 1.5p_2^{\text{D}} + 500, \quad D_2(\mathbf{p}^{\text{D}}) = -2p_2^{\text{D}} - 1.5p_1^{\text{D}} + 500,$$

$$\tau_m(x^{\text{R}}) = 2 \sum_{n=1}^2 \sum_{m=1}^2 x_{mn}^{\text{R}} + 8.$$

污染许可证的初始分配 $l_{mk}^{s0} = 1, \forall m, k, s$. 扩散矩阵 $a_{mk}^1 = m/k$, 若 $m \leq k$; $a_{mk}^1 = 0.5m/k$, 若 $m > k$. $a_{mk}^2 = 2m/k$, 若 $m \leq k$; $a_{mk}^2 = 0.1m/k$, 若 $m > k$. 单位废旧产品可被再制造比例 $\mu = 0.6$, 单位废弃材料的废弃处置成本 $\theta = 2$.

根据上述成本函数和其他相关参数, 首先计算守约模型; 其次, 成员企业如果涉及违约行为, 令单位污染

物处罚成本 $\lambda_{mk}^s = \omega m k s, \forall m, k, s$. 逐步调整 ω 值, 其他成本函数和参数不作改动, 计算违约模型. 不同情形下的均衡结果如图 1~图 7 所示, 此外, 所有许可证的剩余量均为零, 因此, 剩余量的变化图没有列出.

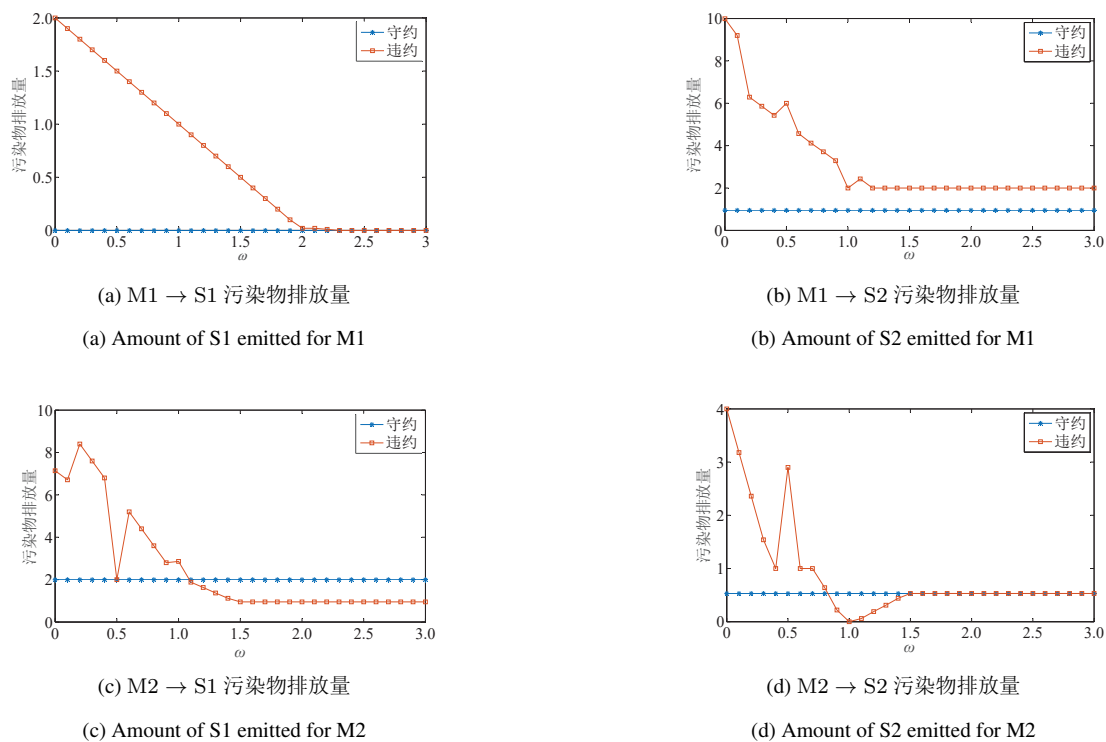


图 1 不同情形下污染物排放数量的均衡值

Fig. 1 Equilibrium values for the amount of pollutants under different cases

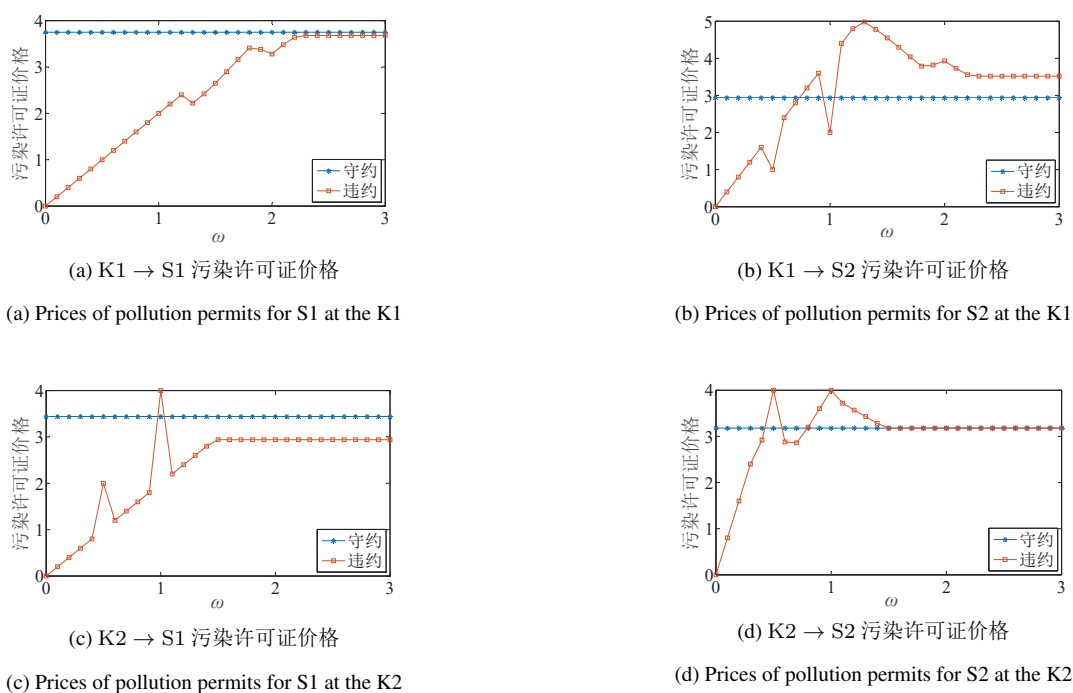


图 2 不同情形下污染许可证价格的均衡值

Fig. 2 Equilibrium values of the prices of pollution permits under different cases

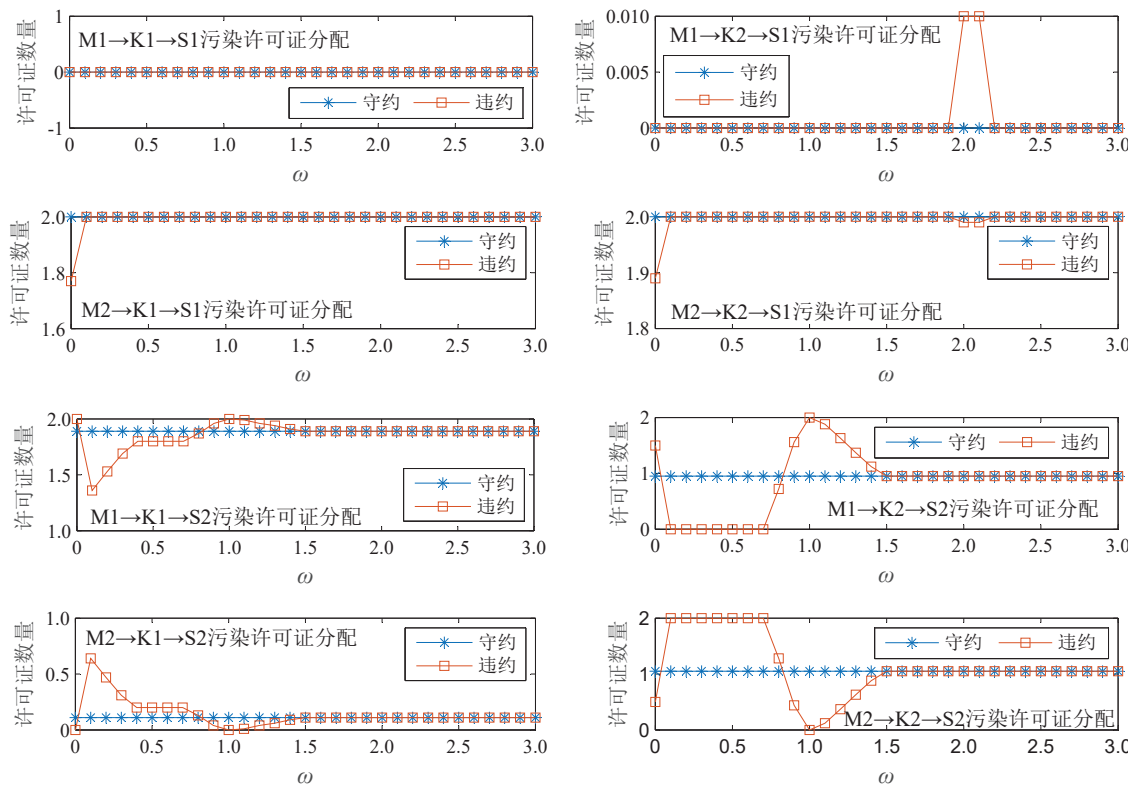


图3 不同情形下污染许可证分配的均衡值

Fig. 3 Equilibrium values of the allotment of pollution permits under different cases

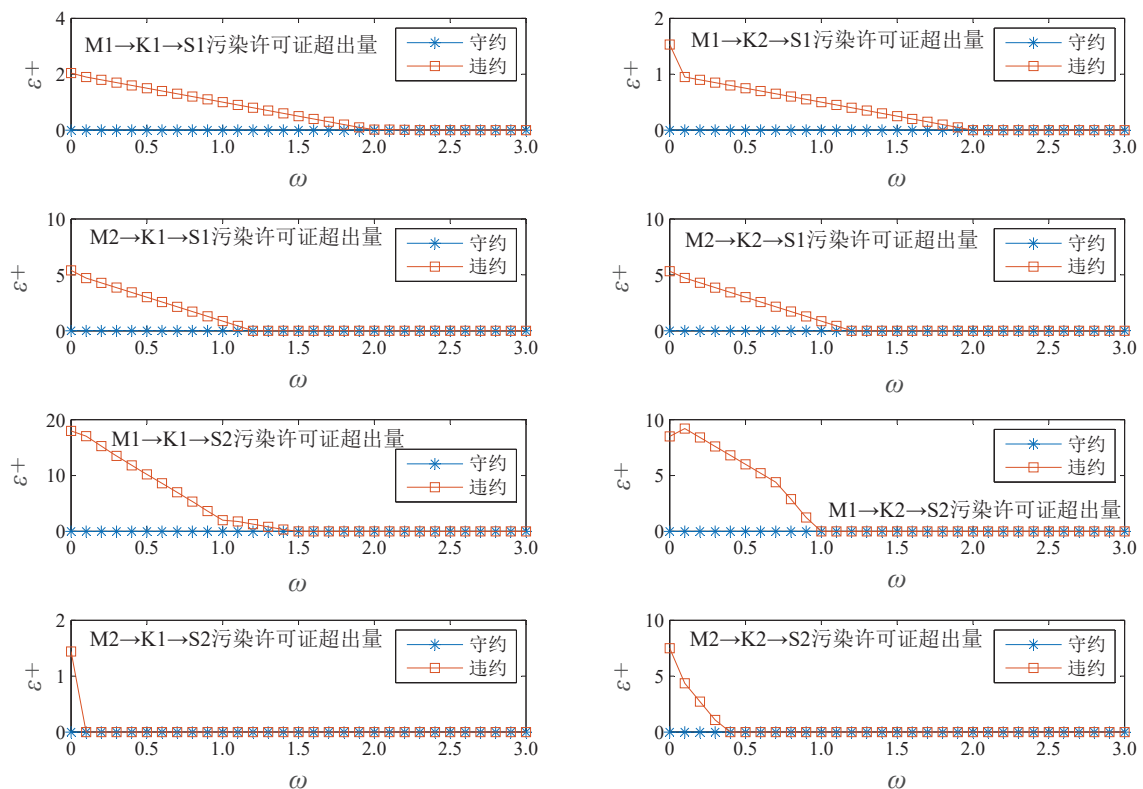
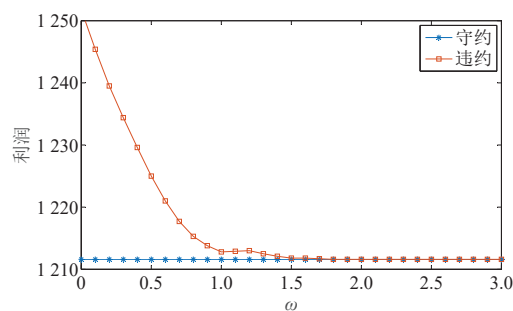


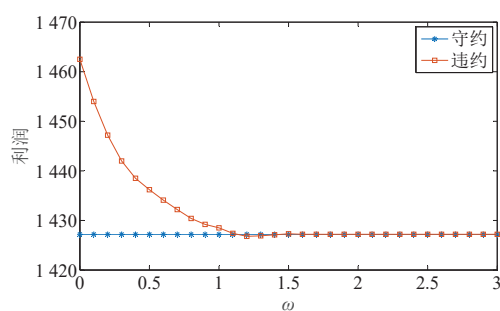
图4 不同情形下污染许可证超出量的均衡值

Fig. 4 Equilibrium values of the pollution permit exceed quantity under different cases



(a) 企业1的利润

(a) Firm 1's profit



(b) 企业2的利润

(b) Firm 2's profit

图5 不同情形下企业利润的变化

Fig. 5 The changes of the profits of firms under different cases

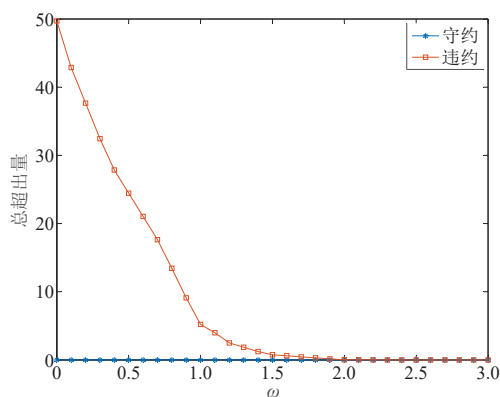


图6 不同情形下污染许可证总超出量的变化

Fig. 6 The Changes of total exceed quantity of the pollution permits under different cases

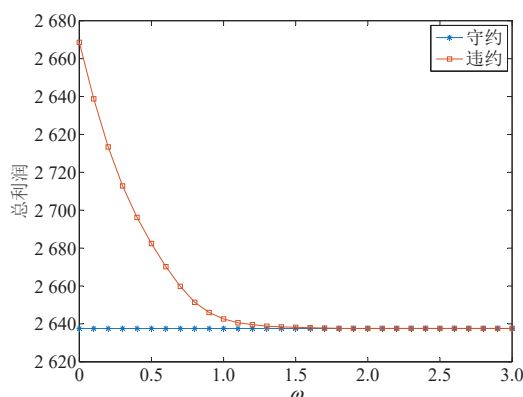


图7 不同情形下企业总利润的变化

Fig. 7 Equilibrium values of the total profit of firms under different cases

通过对不同情形下的均衡结果进行对比, 可以发现:

1) 闭环供应链网络所有企业都履约的情形下, 污染许可证市场出清, 污染许可证的多余供给为零. 如果污染许可证初始分配满足环境目标, 则权威部门指定的环境标准可以达成;

2) 与履约情形下相比, 闭环供应链网络中的成员企业在一定的条件下, 即 $0 \leq \omega < 2.3$ 时, 如果企业选择违约, 则企业可以获取更高的利润, 闭环供应链网络总利润与履约下的总利润相比也会增加;

3) 在闭环供应链网络成员企业存在违约的情形下, 随着 ω 的增加, 相对于持有排放许可证的超出量逐渐减少. 因此, 环境部门可以通过提高单位污染物处罚成本, 达到减少各企业的总违约数量的目的; 此外, 当 ω 增加到一定程度, 即 $\omega \geq 2.3$ 时, 网络中的两个企业均选择零超出量;

4) 随着 ω 的增加, 企业1和企业2的利润也随之变化, 闭环供应链网络总利润逐渐减少, 当 $\omega \geq 2.3$ 时, 两个企业的利润与履约情形下的利润相等.

5 结束语

本文分别分析了履约情形和违约情形下成员企业的均衡条件, 构建了履约情形和违约情形下的博弈模型, 以此研究污染许可证交易制度下闭环供应链网络成员企业间的博弈关系. 同时, 提出了两个模型的求解算法, 最后, 提出算例分别求解履约情形下的模型和违约情形下的模型, 并进行了对比分析. 研究发现前一种情形下如果污染许可证初始分配满足环境目标, 则权威部门指定的环境标准可以达成. 后一种情形下发现, 建立合理的惩罚框架可以保证不出现违约行为. 进一步的研究可以将此模型扩展到动态模型分析.

参考文献:

- [1] 余福茂, 钟永光, 沈祖志. 考虑政府引导激励的电子废弃物回收处理决策模型研究. 中国管理科学, 2014, 22(5): 131–137.
Yu F M, Zhong Y G, Shen Z Z. Decision model on E-waste collecting and recycling considering the leading of government's premium mechanisms. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22(5): 131–137. (in Chinese)
- [2] üster H, Easwaran G, Akcali E, et al. Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model. Naval Research Logistics, 2007, 54(8): 890–907.
- [3] Schultmann F, Engels B, Rentz O. Closed-loop supply chains for spent batteries. Interfaces, 2003, 33(6): 57–71.
- [4] Sahyouni K, Savaskan R C, Daskin M S. A Facility Location Model for Bidirectional Flows. Transportation Science, 2007, 41(4): 484–499.
- [5] Lee D H, Dong M. A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery. Transportation Research: Part E, 2008, 44(3): 455–474.
- [6] Aras D, Aksen A, Tanuğur G. Locating collection centers for incentive dependent returns under a pick-up policy with capacitated vehicles. European Journal of Operational Research, 2008, 191(3): 1223–1240.
- [7] Pishvae M S, Rabbani M, Torabi S A. A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35(2): 637–649.
- [8] Ramezani M, Bashiri M, Tavakkoli-Moghaddam R. A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(2): 328–344.
- [9] Canan S R, Shantanu B, Luk N W. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing. Management Science, 2004, 50(2): 239–252.
- [10] Onur K. Incentive and production decisions for remanufacturing operations. European Journal of Operational Research, 2010, 201(2): 442–453.
- [11] Beril T, Donna W. Cost allocation in manufacturing-remanufacturing operations. Production and Operations Management, 2011, 20(60): 841–847.
- [12] 易余胤, 袁江. 渠道冲突环境下的闭环供应链协调定价模型. 管理科学学报, 2012, 15(1): 54–65.
Yi Y Y, Yuan J. Pricing coordination of closed-loop supply chain in channel conflicts environment. Journal of Management Sciences in China, 2012, 15(1): 54–65. (in Chinese)
- [13] 张曙红, 张金隆, 初叶萍. 基于再制造优先的闭环供应链定价与协调. 系统工程学报, 2013, 28(4): 506–513.
Zhang S H, Zhang J L, Chu Y P. Pricing and coordination of closed-loop supply chain based on remanufacturing priority. Journal of Systems Engineering, 2013, 28(4): 506–513. (in Chinese)
- [14] 牟宗玉, 曹德纲, 刘晓冰, 等. 突发事件下两部收费契约协调闭环供应链研究. 运筹与管理, 2013, 22(5): 35–42.
Mu Z Y, Cao D B, Liu X B, et al. Research on closed-loop supply chain coordination with two-part tariff contract under disruptions. Operations Research and Management Science, 2013, 22(5): 35–42. (in Chinese)
- [15] 王玉燕. 需求与成本双扰动时闭环供应链的生产策略和协调策略. 系统工程理论与实践, 2013, 33(5): 1149–1157.
Wang Y Y. Adjusted production strategy and coordination strategy in closed-loop supply chain when demand and cost disruptions. Systems Engineering: Theory & Practice, 2013, 33(5): 1149–1157. (in Chinese)
- [16] 徐兵, 杨金梅. 需求与回收确定下闭环供应链的竞争与链内协调研究. 中国管理科学, 2014, 22(2): 48–55.
Xu B, Yang J M. Research on the competition of closed-loop supply chains and coordinative contract design within supply chain under determinant functions of product demand and used product supply. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22(2): 48–55. (in Chinese)
- [17] 郭亚军, 马吉睿, 曲道钢. 分类回收条件下闭环供应链的协调问题研究. 工业工程与管理, 2008(6): 6–10.
Guo Y J, Ma J R, Qu D G. On coordination of closed-loop supply chain under the assorted-recycle condition. Industrial Engineering and Management, 2008(6): 6–10. (in Chinese)
- [18] 汪翼, 孙林岩, 杨洪焦, 等. 不同回收法律下的再制造供应链决策与合作研究. 管理科学, 2009, 22(1): 2–8.
Wang Y, Sun L Y, Yang H J, et al. Optimal decisions and coordination contract in a supply chain with remanufacturing under different take-back laws. Journal of Management Sciences, 2009, 22(1): 2–8. (in Chinese)

- [19] 关启亮, 周根贵, 曹 东. 具有政府回收约束的闭环供应链回收再制造决策模型. 工业工程, 2009, 12(5): 40–44.
Guan Q L, Zhou G G, Cao J. Government constrained decision making model in recycling and remanufacturing closed-loop supply chain. Industrial Engineering Journal, 2009, 12(5): 40–44. (in Chinese)
- [20] Atasu A, Van Wassenhove L N, Sarvary M. Efficient take-back legislation. Production and Operations Management, 2009, 18(3): 243–258.
- [21] Hsuan H, Jhih S K. Determining advanced recycling fees and subsidies in E-scrap reverse supply chains. Journal of Environmental Management, 2011, 92(6): 1495–1502.
- [22] 王文宾, 达庆利. 奖惩机制下闭环供应链的决策与协调. 中国管理科学, 2011, 19(1): 36–41.
Wang W B, Da Q L. The decision and coordination under the premium and penalty mechanism for closed-loop supply chain. Chinese Journal of Management Science, 2011, 19(1): 36–41. (in Chinese)
- [23] 杨玉香, 周根贵. EPR下供应链网络报废产品排放内生污染税模型. 管理科学学报, 2011, 14(10): 67–76.
Yang Y X, Zhou G G. An endogenous EOL products emission taxes model for supply chain network under EPR. Journal of Management Sciences in China, 2011, 14(10): 67–76. (in Chinese)
- [24] 马卫民, 赵 璋. 以旧换新补贴对不同模式闭环供应链的影响. 系统工程理论与实践, 2012, 32(9): 1938–1944.
Ma W M, Zhao Z. Different models of closed-loop supply chain with the government replacement-subsidy. Systems Engineering: Theory & Practice, 2012, 32(9): 1938–1944. (in Chinese)
- [25] 马卫民, 赵 璋. 以旧换新补贴对具有不同等级产品闭环供应链的影响研究. 中国管理科学, 2013, 21(3): 113–117.
Ma W M, Zhao Z. How does government replacement-subsidy influence the closed-loop supply chain with different grades of products. Chinese Journal of Management Science, 2013, 21(3): 113–117. (in Chinese)
- [26] Montgomery W D. Markets in licenses and efficient pollution control programs. Journal of Economic Theory, 1972, 5(3): 395–418.

作者简介:

杨玉香 (1979—), 女, 吉林松原人, 博士, 副教授, 研究方向: 供应链管理, 逆向物流, Email: yyx_bj2005@126.com.

致谢:

本文受浙江省人文社科基地“管理科学与工程”, 浙江省哲学社会科学重点研究基地“产业发展政策研究中心”(15JDCY02-YB)和浙江省标准化与知识产权管理协同创新中心资助。

(上接第 748 页)

- [26] Zitzler E, Thiele L, Laumanns M, et al. Performance assessment of multiobjective optimizers: An analysis and review. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2003, 7(2): 117–132.

作者简介:

付亚平(1985—), 男, 山东青岛人, 博士生, 研究方向: 多目标优化算法, 生产计划与调度, Email: fuyaping@qdu.edu.cn;

王洪峰(1979—), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 副教授, 研究方向: 进化计算, 人工智能, 物流与供应链管理, Email: hfwang@mail.neu.edu.cn;

黄 敏(1968—), 女, 福建长乐人, 博士, 教授, 研究方向: 物流与供应链管理, 生产计划, 调度与存储控制, 行为运筹, 风险管理和软计算等, Email: mhuang@mail.neu.edu.cn;

王兴伟 (1968—), 男, 辽宁盖县人, 博士, 教授, 研究方向: 下一代互联网, 光互联网和移动互联网等, Email: wangxw@mail.neu.edu.cn.