复合碳减排政策下闭环供应链网络均衡决策

程发新[1], 袁 猛[1,2], 孙立成[1], 罗建强[1]

(1. 江苏大学管理学院, 江苏 镇江 212013;

2. 上海汽车变速器有限公司, 上海 201807)

摘要: 为探究市场需求不确定环境下, 碳减排政策交叉使用对闭环供应链网络均衡决策的影响, 运用均衡理论和变分不等式方法, 构建了复合碳减排政策下需求不确定型闭环供应链网络均衡决策模型, 分析了网络各层的最优决策行为, 并通过典型情景分别讨论了碳限额、碳补贴对供应链网络均衡决策的影响. 结果表明较高的碳补贴可实现企业经济绩效与环境绩效的双赢, 但它对消费者不利. 同时, 市场需求的不确定性对高、低碳补贴区间的确定有影响.

关键词: 复合碳减排政策; 碳排放; 需求不确定; 闭环供应链网络; 均衡决策; 变分不等式

中图分类号: F274 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000−5781(2019)04−0483−14

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2019.04.005

Equilibrium decision research of closed-loop supply chain network with compound carbon emission reduction policy

Cheng Faxin[1], **Yuan Meng**[1,2], **Sun Licheng**[1], **Luo Jianqiang**[1]

(1. School of Management, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Shanghai Automobile Gear Works Co., Ltd., Shanghai 201807, China)

Abstract: In order to explore the effect of cross-use of carbon emission reduction policy on the equilibrium decision of closed-loop supply chain network under uncertain market demand, the equilibrium theory and variational inequality method are used to construct an equilibrium decision model of uncertain demand closed-loop supply chain network with compound carbon emission reduction policy. The optimal decision of each layer in the network is analyzed, and the impacts of carbon emission limits and carbon subsidy on the equilibrium decision of supply chain network are discussed respectively through typical scenarios. The results show that higher carbon subsidy can achieve a win-win situation for an enterprise's economic performance and environmental performance, though it is detrimental to consumers. Meanwhile, the uncertainty of market demand influences the determination of high and low carbon subsidy interval.

Key words: compound carbon emission reduction policy; carbon emission; uncertain demand; closed-loop supply chain network; equilibrium decision; variational inequality

1 引 言

在全球气候环境不断恶化的背景下, 中国作为世界上最大碳排放国面临的压力巨大. 为此, 我国政府在2009年的哥本哈根气候大会上承诺: 到2020年单位GDP二氧化碳排放将比2005年下降40%到45%. 2015年11月30日, 巴黎气候大会上习近平主席重申: 我国将于2030年左右使二氧化碳排放达到峰值并争取

收稿日期: 2017−03−14; 修订日期: 2017−09−28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71673118; 71473107; 71472077).

尽早实现, 2030年国内单位生产总值二氧化碳排放比2005年下降60% ∼ 65%. 实际上中国政府为应对气候变化和生态环境的问题, 已经出台了一系列节能减排政策. 据相关学者调查发现, 从1997年至2013年间我国出台与节能减排相关的政策就高达1 052条[1]. 同时, 针对具体行业, 不同减排政策也相继颁布. 如2015年各级政府部门实施300亿元左右的补贴政策, 旨在促进汽车行业的节能减排[2]. 但据中国经济新闻网报道, 2017年试点的碳配额政策, 将对减排不达标的车企征收3倍∼5倍高额罚款[3]. 此外, 2017 年我国更是将国内单位GDP二氧化碳排放量的下降目标由2016年的3.9% 提升至4%[4]. 刚性碳减排约束下, 企业作为碳减排实施主体, 面临来自政府的碳排放规制必将越来越严, 其所处的竞争环境也愈加复杂多变. 同时, 企业竞争已转变为供应链之间竞争, 它们的经营环境更趋于多层供应链网络. 因此, 碳减排政策下企业的减排决策与供应链网络同层、上下游企业的决策密切相关, 减排目标的实现仅通过单个企业运营策略的改变效果甚微[5]. 鉴于此, 文中将碳减排政策纳入供应链网络环境, 深入研究其均衡决策问题尤为必要.

对供应链网络均衡决策问题的研究, 主要始于Nagurney等率先利用变分不等式和均衡理论, 构建由多个制造商、多个零售商、多个需求市场组成的供应链网络均衡模型, 该模型为解决供应链成员竞争博弈下的均衡决策问题提供了有效的方法[6]. 随后, Nagurney等与Yu等分别针对电力供应链网络、食品供应链网络的均衡决策问题进行了研究[7,8]. 随着生态环境的持续恶化、资源短缺和节能减排法律法规的实施, 越来越多的学者将供应链网络均衡决策问题拓展至闭环的情形, 考虑具有回收行为的闭环供应链网络均衡决策问题.

目前, 对闭环供应链网络均衡决策问题的研究, 主要集中在两个方面: 一方面关注企业回收与再制造共存的情形. 例如, Yang等建立第三方回收模式下考虑制造商存在再制造行为的闭环供应链网络均衡决策模型[9]. Qiang等则将供应链网络均衡模型扩展到制造商回收再制造的情形, 研究制造商投资回收渠道促进废旧产品回收与再制造的网络均衡决策问题[10]. 张桂涛等分析了库存可跨周期转移的情况下, 政府部门强制制造商回收废旧产品对网络均衡模型的影响, 指出政府部门应避免强制回收量打破网络原有的均衡状态[11]. 张桂涛等又考察库存转移与库存能力共同影响制造商回收与再制造活动时, 网络企业的均衡决策行为[12]. Qiang等研究再制造产品与新产品差异化情况下的闭环供应链网络均衡决策问题[13]. Rezapour等假设再制造产品和新产品异质, 构建两种不同类型供应链的网络均衡模型, 认为新产品和再制造产品之间的竞争不应仅限于同一类闭环供应链的网络环境, 该文发现供应链网络结构会影响企业的决策与绩效[14]. 另一方面, 关注政府奖惩机制的情形. 例如, Hammod等探讨了WEEE法规对闭环供应链网络均衡的影响, 指出WEEE法规可促进企业的回收行为, 可能成为企业经济增长的源泉[15]. 杨玉香等从生产者责任延伸角度出发, 构建征收污染税的闭环供应链网络均衡决策模型[16], 并在电子废弃物排放许可证制度下, 研究闭环供应链网络成员的决策优化行为, 研究发现政府处罚力度直接决定了企业是否超额排放电子废弃物[17]. 孙浩等研究政府补贴促使制造商回收废旧产品的闭环供应链网络模型, 主张政府部门需实施回收补贴改善闭环供应链网络的经济绩效[18].

由于企业大量排放二氧化碳具有外部性不经济问题, 需对碳排放企业征收碳税或实施碳补贴[19,20]. 因此, 将碳减排政策引入供应链网络对其均衡决策问题的探讨已引起越来越多学者的关注[21−26], 但现有研究仍存在一些不足: 一是考虑复合碳减排政策对供应链网络均衡决策影响的研究还非常少见[27], 现有研究主要考虑单一碳减排政策, 而相关研究已表明复合政策对碳排放量控制更有效[28]. 同时, 研究单一碳减排政策对供应链网络均衡决策的影响, 主要针对正向供应链网络, 且大多考虑碳税政策. 例如, Wu等构建包含碳税的电力供应链网络均衡模型, 研究不同碳税下的网络均衡决策[21]. Nagurney等针对电力供应链网络, 分析网络均衡状态下政府最优碳税决策[22]. 朱莉[23]、周岩等[24]则从经济与环境协调发展的角度出发, 通过碳税政策将碳排放量转化为碳成本, 探讨税收政策下碳排放量最小且利润最大的均衡策略. 此外, 马秋卓等将碳交易市场纳入正向供应链网络, 构建供应链碳交易超网络模型, 分析碳排放权约束对网络均衡决策与碳排放降低的影响[25]. 事实上, 相关部门在应对环境问题时更倾向于对所属企业设定碳排放限额, 以实现政府碳减排控制目标[26,29]. 尽管Zhang等基于第三方回收模式, 研究碳限额政策作用下闭环供应链网络产量、定

价均衡决策问题, 但该研究没有考虑碳补贴[26]. 而本文认为当企业实现碳限额目标时, 实施碳补贴等激励政策可促进闭环供应链网络成员的减排行为. 二是现有文献将碳减排政策纳入闭环供应链网络均衡决策的研究, 其前提假设是市场需求确定[21−26]. 然而, 随着市场竞争的加剧和科学技术的进步, 产品生命周期将不断地缩短, 市场需求波动性将会越来越大[30]. 在这种情况下, 闭环供应链网络中市场需求确定的假设已不再符合市场需求具有波动性的现实.

基于上述, 文中考虑由碳排放限额、碳税以及碳补贴组成的复合碳减排政策, 并假设市场需求不确定, 研究闭环供应链网络均衡决策的主要问题是: (1)复合碳减排政策如何影响闭环供应链网络各层成员最优决策行为, 同时政府部门、网络各层成员为达到预期碳限额目标, 应如何制定最优的碳减排政策以及如何做出产量、价格等最优决策? (2)复合碳减排政策下市场需求不确定对闭环供应链网络均衡状态有何影响? 尤其是市场需求不确定因素对碳减排政策制定有何干扰作用?

2　闭环供应链网络各层决策行为及均衡条件

2.1　问题描述及相关假设

文中研究的闭环供应链网络包括制造商层、零售商层和需求市场层, 具体如图1所示. 网络中存在I个制造商, 将其中某制造商记为i, 且$i = 1, 2, \cdots, I$; 存在J个零售商, 将其中某个零售商记为j, 且$j = 1, 2, \cdots, J$; 存在K个需求市场, 将其中某一需求市场记为k, 且$k = 1, 2, \cdots, K$. 图1左边部分表示正向供应链网络, 制造商将生产的新产品与再制造产品批发给不同零售商, 零售商层将产品销往对应的需求市场层, 且一个零售商只满足一个市场的不确定性需求. 图1右边部分表示逆向供应链网络, 制造商负责从需求市场中回收废旧产品, 并进行再制造. 其中实线箭头为正向供应链网络的产品交易; 虚线箭头为逆向供应链网络的废旧品回收; 正向供应链网络中制造商、需求市场与逆向供应链网络中制造商、需求市场之间的虚线连接, 表示正向供应链网络与逆向供应链网络共同使用制造商、需求市场节点, 组成本文研究的闭环供应链网络结构.

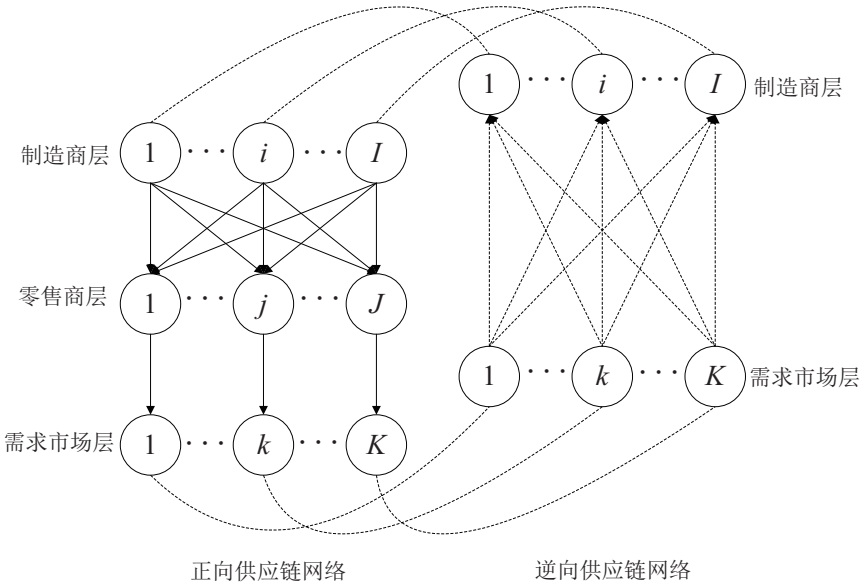

图 1　闭环供应链网络结构

Fig. 1　Closed loop supply chain network structure

文中考虑的复合碳减排政策主要包括碳排放限额、碳税以及碳补贴政策. 在政府部门碳限额约束下制造商的碳排放行为将会受到限制; 当制造商碳排放量小于政府部门规定的碳排放限额时, 政府部门会对其未超出的部分碳排放量实施碳补贴, 制造商可获得碳补贴收益; 而当制造商碳排放量大于或等于政府部门

规定的限额时, 制造商获得的碳补贴收益为零, 此时政府部门对企业存在征收碳税的行为. 为研究碳限额约束下政府部门的最优碳税制定问题, 本文假设碳税为闭环供应链网络均衡状态下的内生值, 碳税税率的变化受到碳限额和网络成员决策行为的影响.

由于研究问题的复杂性, 本文在不改变问题实质的前提下, 对一些复杂的条件加以简化, 并提出一些基本假设.

假设1 制造商生产的新产品与再制造产品对于零售商、需求市场来说同质无差异;

假设2 假设网络中同一层的成员为非合作竞争关系;

假设3 每个制造商可与所有零售商交易、可从所有需求市场回收废旧产品; 每个零售商只能满足一个需求市场的需求, 零售商j与需求市场k为一一对应关系, 那么供应链网络中零售商数量等于需求市场的数量, 即$J=K$. 为避免混淆, 文中将零售商、需求市场的符号做了区分.

2.2 制造商层决策行为及均衡条件

设q_{ij}为制造商i与零售商j的产品交易量, 所有交易量组成IJ维列向量$\boldsymbol{Q_1}$, 且$\boldsymbol{Q_1}\in R_+^{IJ}$; q_{ki}为制造商i从需求不确定市场k的回收量, 所有回收量组成KI维列向量$\boldsymbol{Q_2}$, 且$\boldsymbol{Q_2}\in R_+^{KI}$; q_i^{NEW}为制造商i生产新产品数量, 所有制造商生产的新产品数量组成I维列向量$\boldsymbol{q}^{\mathrm{NEW}}$, 且$\boldsymbol{q}^{\mathrm{NEW}}\in R_+^{I}$; ρ_{ij}、ρ_{ki}为模型的内生变量, 分别表示制造商i与零售商j的产品交易价格、与需求市场k的废旧产品回收价格; $c_{ij}(q_{ij})$为制造商i与零售商j交易过程中产生的交易成本函数; f_i^R为制造商i生产再制造产品成本函数, 且$f_i^R=f_i^R(\boldsymbol{Q_2})$; f_i^{NEW}为制造商i生产新产品成本函数, 且$f_i^{\mathrm{NEW}}=f_i^{\mathrm{NEW}}(\boldsymbol{q}^{\mathrm{NEW}})$; e_i^{NEW}、e_i^R、e_i为制造商i生产新产品、再制造产品以及运输产品过程中的单位碳排放量; u为制造商i回收废旧产品的再制造率; P_i表示政府部门向制造商i征收的碳税, 组成I维列向量$\boldsymbol{P}$, $\boldsymbol{P}\in R_+^I$; A_i表示政府部门给制造商i设定的碳排放限额; b_i为政府部门对制造商i碳排放量低于碳排放限额时的碳补贴系数. 值得说明的是, 文中将带*号上标的变量记为其对应变量的最优值.

对于制造商i而言, $e_i^{\mathrm{NEW}}q_i^{\mathrm{NEW}}+e_i^R\sum\limits_{k=1}^{K}q_{ki}+e_i\sum\limits_{j=1}^{J}q_{ij}$为其运营过程(生产新产品、再制造产品以及运输过程)的碳排放量, 文中将其记为CE_i. 当制造商i碳排放量小于碳排放限额时, 则制造商i未超出碳限额的部分碳排放量记为$\Delta\mathrm{CE}_i=A_i-\mathrm{CE}_i$, 此时制造商$i$获得碳补贴收益为$b_i\Delta\mathrm{CE}_i$. 当制造商$i$碳排放量大于或等于政府部门规定的限额时, 政府部门根据其碳排放量大小征收碳税, 此时制造商i的碳税成本为$P_i\mathrm{CE}_i$. 而本文研究的碳税为闭环网络均衡状态下内生最优碳税, 网络均衡状态下其数学模型为

$$\begin{cases}\Delta\mathrm{CE}_i=0, & 若P_i^*>0,\\ \Delta\mathrm{CE}_i\geqslant 0, & 若P_i^*=0.\end{cases}\tag{1}$$

式中当闭环供应链网络处于均衡状态时, 且制造商i运营过程产生的碳排放量小于政府部门规制的碳排放限额时, 政府部门不征税, 否则征税. 这主要由于在闭环供应链网络均衡状态下, 当最优碳税大于零时, 则制造商i运营过程产生的碳排放量等于政府部门规定的碳排放限额.

令ρ_{ij}^*,ρ_{ki}^*分别表示ρ_{ij},ρ_{ki}的均衡值, 可得制造商i利润最大化决策模型

$$\mathrm{Max}\,\pi_i=\sum_{j=1}^{J}\rho_{ij}^*q_{ij}-f_i^R(\boldsymbol{Q}_2)-f_i^{\mathrm{NEW}}(\boldsymbol{q}^{\mathrm{NEW}})-\sum_{j=1}^{J}c_{ij}(q_{ij})-\sum_{k=1}^{K}\rho_{ki}^*q_{ki}-P_i^*\mathrm{CE}_i+b_i\Delta\mathrm{CE}_i,\tag{2}$$

$$\text{s.t.}\quad u\sum_{k=1}^{K}q_{ki}+q_i^{\mathrm{NEW}}\geqslant\sum_{j=1}^{J}q_{ij}.\tag{3}$$

假设制造商i生产新产品成本函数f_i^{NEW}、再制造产品成本函数f_i^R以及与零售商j的交易成本函数$c_{ij}(q_{ij})$均为连续可微的凸函数. 若所有制造商为非合作竞争关系, 则Nash均衡条件下所有制造商同时决

策的最优条件等价于下列变分不等式的解[6], 即其最优解$(\boldsymbol{Q_1^*}, \boldsymbol{Q_2^*}, \boldsymbol{q}^{\mathrm{NEW}*}, \boldsymbol{\lambda^*}, \boldsymbol{P^*}) \in R_+^{IJ+KI+I+I+I}$满足

$$\begin{aligned}
&\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}[\tfrac{\partial f_i^{\mathrm{NEW}}(\boldsymbol{q}^{\mathrm{NEW}*})}{\partial q_i^{\mathrm{NEW}}} + P_i^*\tfrac{\partial \mathrm{CE}_i}{\partial q_i^{\mathrm{NEW}}} - b_i\tfrac{\partial \Delta\mathrm{CE}_i}{\partial q_i^{\mathrm{NEW}}} - \lambda_i^*](q_i^{\mathrm{NEW}} - q_i^{\mathrm{NEW}*}) + \\
&\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}[\tfrac{\partial c_{ij}(q_{ij}^*)}{\partial q_{ij}} - \rho_{ij}^* + P_i^*\tfrac{\partial \mathrm{CE}_i}{\partial q_{ij}} - b_i\tfrac{\partial \Delta\mathrm{CE}_i}{\partial q_{ij}} + \lambda_i^*](q_{ij} - q_{ij}^*) + \\
&\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}[\tfrac{\partial f_i^R(\boldsymbol{Q_2^*})}{\partial q_{ki}} + \rho_{ki}^* + P_i^*\tfrac{\partial \mathrm{CE}_i}{\partial q_{ki}} - b_i\tfrac{\partial \Delta\mathrm{CE}_i}{\partial q_{ki}} - u\lambda_i^*](q_{ki} - q_{ki}^*) + \\
&\sum_{i=1}^{I}[u\sum_{k=1}^{K}q_{ki}^* + q_i^{\mathrm{NEW}*} - \sum_{j=1}^{J}q_{ij}^*](\lambda_i - \lambda_i^*) + \sum_{i=1}^{I}[\Delta\mathrm{CE}_i](P_i - P_i^*) \geqslant 0, \\
&\forall(\boldsymbol{Q_1}, \boldsymbol{Q_2}, \boldsymbol{q}^{\mathrm{NEW}}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{P}) \in R_+^{IJ+KI+I+I+I}.
\end{aligned} \tag{4}$$

式中 λ_i为制造商i关于约束条件式(3)的Lagrange乘子.

若制造商层达到均衡状态时, 根据式(4)第一项可得$\lambda_i^* = \dfrac{\partial f_i^{\mathrm{NEW}}(\boldsymbol{q}^{\mathrm{NEW}*})}{\partial q_i^{\mathrm{NEW}}} + P_i^*\dfrac{\partial \mathrm{CE}_i}{\partial q_i^{\mathrm{NEW}}} - b_i\dfrac{\partial \Delta\mathrm{CE}_i}{\partial q_i^{\mathrm{NEW}}}$. 根据式(4)第二项可得$\rho_{ij}^* = \dfrac{\partial c_{ij}(q_{ij}^*)}{\partial q_{ij}} + P_i^*\dfrac{\partial \mathrm{CE}_i}{\partial q_{ij}} - b_i\dfrac{\partial \Delta\mathrm{CE}_i}{\partial q_{ij}} + \lambda_i^* = \dfrac{\partial c_{ij}(q_{ij}^*)}{\partial q_{ij}} + \dfrac{\partial f_i^{\mathrm{NEW}}(\boldsymbol{q}^{\mathrm{NEW}*})}{\partial q_i^{\mathrm{NEW}}} + P_i^*(\dfrac{\partial \mathrm{CE}_i}{\partial q_{ij}} + \dfrac{\partial \mathrm{CE}_i}{\partial q_i^{\mathrm{NEW}}}) - b_i(\dfrac{\partial \Delta\mathrm{CE}_i}{\partial q_{ij}} + \dfrac{\partial \Delta\mathrm{CE}_i}{\partial q_i^{\mathrm{NEW}}})$, 即当制造商$i$出售产品价格与碳补贴收益(对运输过程、生产新产品过程碳补贴)之和, 等于制造商i边际交易、生产新产品成本以及碳税(对运输过程、生产新产品过程征收碳税)三者之和时, 制造商i才会考虑与零售商i 进行产品交易, 否则不会有产品交易行为. 根据式(4)第三项可得$\lambda_i^* = \dfrac{1}{u}(\rho_{ki}^* + \dfrac{\partial f_i^R(\boldsymbol{Q_2^*})}{\partial q_{ki}} + P_i^*\dfrac{\partial \mathrm{CE}_i}{\partial q_{ki}} - b_i\dfrac{\partial \Delta\mathrm{CE}_i}{\partial q_{ki}})$, 即当制造商$i$愿意支付的回收价格、生产再制造产品边际成本、碳税(对再制造过程征收碳税)三者之和与其碳补贴收益(对再制造过程碳补贴)之差除以u, 等于制造商i生产新产品边际成本、碳税(对生产新产品过程征收碳税)两者之和减去其碳补贴收益(对生产新产品过程碳补贴)时, 制造商i才会考虑回收废旧产品进行再制造, 否则不会回收废旧产品. 根据式(4)第四项可知, 在网络均衡状态下, 制造商i回收废旧产品的可再制造量与新产品产量之和等于其与零售商i的产品交易量. 根据式(4)第五项可得, 若政府部门存在向制造商i征收碳税的行为, 那么制造商i运营过程产生的碳排放量等于政府部门给制造商i 设定的碳排放限额, 这表明政府部门可通过征收碳税的方式, 规制制造商i运营活动以实现碳减排目标.

2.3　零售商层决策行为及均衡条件

设ρ_j为零售商j的销售价格, 它们组成列向量为$\boldsymbol{\rho} \in R_+^J$; f_j为零售商j储存、展示产品成本函数, 其大小不仅受零售商j从制造商采购的产品数量影响, 还受到其它零售商采购量的影响, 即$f_j = f_j(\boldsymbol{Q_1})$; h_j^+、h_j^-分别为零售商j单位库存成本和单位缺货成本; q_j 表示零售商j与所有制造商交易总量, 即$q_j = \sum\limits_{i=1}^{I} q_{ij}$; d_j 表示当零售商价格为ρ_j时, 其对应需求市场k的需求量, 其概率密度函数为$g_j(x, \rho_j)$, 分布函数为$G_j(x, \rho_j)$. 由于市场需求的不确定性, 零售商可能存在产品滞销或缺货, 则零售商j的利润函数为

$$\pi_j = \begin{cases} \rho_j d_j - \sum\limits_{i=1}^{I}\rho_{ij}q_{ij} - f_j(\boldsymbol{Q_1}) - h_j^+(q_j - d_j), & 若 d_j \leqslant q_j, \\ \rho_j q_j - \sum\limits_{i=1}^{I}\rho_{ij}q_{ij} - f_j(\boldsymbol{Q_1}) - h_j^-(d_j - q_j), & 若 d_j > q_j. \end{cases} \tag{5}$$

当零售商j的产品采购量大于或等于市场k需求时, 零售商j的库存费用为$\varDelta_j^+ = h_j^+\max\{0, q_j - d_j\}$, 其期望库存费用为

$$\mathrm{E}(\varDelta_j^+) = h_j^+\int_0^{q_j}(q_j - x)g_j(x, \rho_j)\mathrm{d}x. \tag{6}$$

当零售商j的产品采购量小于市场k需求时, 零售商j的缺货费用为$\varDelta_j^- = h_j^-\max\{0, d_j - q_j\}$, 其期望缺

货费用为

$$\mathrm{E}(\Delta_j^-) = h_j^- \int_{q_j}^{\infty} (x - q_j) g_j(x, \rho_j) \mathrm{d}x. \tag{7}$$

那么, 零售商j的销售收入为销售价格乘以其产品采购量与市场需求的最小值, 记为$\rho_j \min\{q_j, d_j\}$, 其中零售商j与需求不确定市场k的交易量为$\min\{d_j, q_j\} = q_j - \Delta_j^+/h_j^+$. 令$\rho_j^*$表示$\rho_j$的均衡值, 则根据成本收益法可得零售商$j$的期望利润最大化模型为

$$\begin{aligned}\mathrm{Max}\,\mathrm{E}(\pi_j) &= \mathrm{E}(\rho_j^* \min\{q_j, d_j\}) - \mathrm{E}(\Delta_j^+ + \Delta_j^-) - \sum_{i=1}^{I} \rho_{ij} q_{ij} - f_j(\boldsymbol{Q}_1) \\ &= \rho_j^* q_j - (\rho_j^*/h_j^+ + 1)\mathrm{E}(\Delta_j^+) - \mathrm{E}(\Delta_j^-) - \sum_{i=1}^{I} \rho_{ij} q_{ij} - f_j(\boldsymbol{Q}_1).\end{aligned} \tag{8}$$

为求解零售商层最优决策均衡条件的变分不等式模型, 首先对式(6)、式(7)分别求q_{ij}的一阶偏导可得

$$\frac{\partial \mathrm{E}(\Delta_j^+)}{\partial q_{ij}} = \frac{\partial [h_j^+ \int_0^{q_j} (q_j - x) g_j(x, \rho_j) \mathrm{d}x]}{\partial q_{ij}} = h_j^+ G_j(q_j, \rho_j), \tag{9}$$

$$\frac{\partial \mathrm{E}(\Delta_j^-)}{\partial q_{ij}} = \frac{\partial [h_j^- \int_{q_j}^{\infty} (x - q_j) g_j(x, \rho_j) \mathrm{d}x]}{\partial q_{ij}} = h_j^- [G_j(q_j, \rho_j) - 1]. \tag{10}$$

其次, 假设零售商j的成本函数为连续可微的凸函数, 则所有零售商同时决策的最优条件等价于下列变分不等式的解, 即最优解$(\boldsymbol{Q}_1^*) \in R_+^{IJ}$满足

$$\sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} [(\rho_j^* + h_j^+ + h_j^-) G_j(q_j, \rho_j^*) - \rho_j^* - h_j^- + \rho_{ij}^* + \frac{\partial f_j(\boldsymbol{Q}_1^*)}{\partial q_{ij}}](q_{ij} - q_{ij}^*) \geqslant 0, \forall \boldsymbol{Q}_1 \in R_+^{IJ}. \tag{11}$$

2.4 需求不确定市场层决策的均衡条件

当需求市场层达到均衡状态时, 由于需求市场k与零售商j是一一对应关系，那么若需求市场k的消费者存在从零售商j购买产品的行为, 则市场k对零售商j的产品需求量等于零售商j的采购量, 则需求不确定市场k的决策均衡条件为

$$\begin{cases} d_j = \sum\limits_{i=1}^{I} q_{ij}^*, & 若\rho_j^* > 0, \\ d_j \leqslant \sum\limits_{i=1}^{I} q_{ij}^*, & 若\rho_j^* = 0, \end{cases} \tag{12}$$

则需求不确定市场层决策的最优行为等价于下列变分不等式, 即最优解$(\boldsymbol{\rho}^*) \in R_+^J$满足

$$\sum_{j=1}^{J} \left[\sum_{i=1}^{I} q_{ij}^* - d_j \right] (\rho_j - \rho_j^*) \geqslant 0, \forall \boldsymbol{\rho} \in R_+^J. \tag{13}$$

2.5 逆向供应链网络均衡决策的条件

设$c_{ki}(q_{ki})$为需求不确定市场k向制造商i出售废旧产品过程中产生的交易成本函数. 在逆向供应网络成员的回收决策过程中, 需求不确定市场k中的消费者将根据自身的交易成本和制造商i提供的回收价格, 决定是否将废旧产品出售给制造商.均衡状态下, 若需求不确定市场k中的消费者与制造商i存在废旧产品交易行为, 即均衡状态下最优回收量$q_{ki}^* > 0$, 则需求不确定市场k中的消费者交易费用不会超过制造商i愿意支付的回收价格. 则对于逆向供应链网络, 其均衡决策条件为

$$\begin{cases} c_{ki}(q_{ki}^*) = \rho_{ki}^*, & 若q_{ki}^* > 0, \\ c_{ki}(q_{ki}^*) \geqslant \rho_{ki}^*, & 若q_{ki}^* = 0, \end{cases} \tag{14}$$

式中, 均衡条件等价于下列变分不等式问题, 即最优解$(\boldsymbol{Q}_2^*) \in R_+^{KI}$满足

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}[c_{ki}(q_{ki}^*)-\rho_{ki}^*](q_{ki}-q_{ki}^*) \geqslant 0, \forall \boldsymbol{Q}_2 \in R_+^{KI}. \tag{15}$$

3　闭环供应链网络均衡决策模型的构建及算法

3.1　闭环供应链网络均衡决策模型构建

闭环供应链网络均衡状态下, 所有成员做出最终决策是其相互博弈的稳态最优解. 根据文献[6]可知, 闭环供应链网络达到均衡状态时, 制造商层、零售商层和需求不确定市场层需同时满足式(4)、式(11)、式(13)和式(15)的均衡决策条件, 即满足式(4)、式(11)、式(13) 与式(15)四个变分不等式之和. 由此, 复合碳减排政策下需求不确定型闭环供应链网络均衡条件等价于下列变分不等式的解, 即最优解$(\boldsymbol{q}^{\mathrm{NEW}*}, \boldsymbol{Q}_1^*, \boldsymbol{Q}_2^*, \boldsymbol{P}^*, \boldsymbol{\rho}^*, \boldsymbol{\lambda}^*) \in R_+^{I+IJ+KI+I+J+I}$满足

$$\begin{aligned}
&\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\left[\frac{\partial f_i^{\mathrm{NEW}}(\boldsymbol{q}^{\mathrm{NEW}*})}{\partial q_i^{\mathrm{NEW}}}+P_i^*\frac{\partial \mathrm{CE}_i}{\partial q_i^{\mathrm{NEW}}}-b_i\frac{\partial \Delta\mathrm{CE}_i}{\partial q_i^{\mathrm{NEW}}}-\lambda_i^*\right](q_i^{\mathrm{NEW}}-q_i^{\mathrm{NEW}*})+\\
&\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\left[\frac{\partial f_j(\boldsymbol{Q}_1^*)}{\partial q_{ij}}+\frac{\partial c_{ij}(q_{ij}^*)}{\partial q_{ij}}+P_i^*\frac{\partial \mathrm{CE}_i}{\partial q_{ij}}-b_i\frac{\partial \Delta\mathrm{CE}_i}{\partial q_{ij}}+(\rho_j^*+h_j^++h_j^-)G_j(q_j,\rho_j^*)-\rho_j^*-h_j^-+\lambda_i^*\right]\\
&(q_{ij}-q_{ij}^*)+\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}\left[\frac{\partial f_i^R(\boldsymbol{Q}_2^*)}{\partial q_{ki}}+c_{ki}(q_{ki}^*)+P_i^*\frac{\partial \mathrm{CE}_i}{\partial q_{ki}}-b_i\frac{\partial \Delta\mathrm{CE}_i}{\partial q_{ki}}-u\lambda_i^*\right](q_{ki}-q_{ki}^*)+\\
&\sum_{i=1}^{I}[\Delta\mathrm{CE}_i](P_i-P_i^*)+\sum_{j=1}^{J}\left[\sum_{i=1}^{I}q_{ij}^*-d_j\right](\rho_j-\rho_j^*)+\\
&\sum_{i=1}^{I}\left[u\sum_{k=1}^{K}q_{ki}^*+q_i^{\mathrm{NEW}*}-\sum_{j=1}^{J}q_{ij}^*\right](\lambda_i-\lambda_i^*)\geqslant 0, \forall(\boldsymbol{q}^{\mathrm{NEW}}, \boldsymbol{Q}_1, \boldsymbol{Q}_2, \boldsymbol{P}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\lambda}) \in R_+^{I+IJ+KI+I+J+I}.
\end{aligned} \tag{16}$$

可将式(16)简写成如下标准变分不等式形式, 即求解$\boldsymbol{X}^* \in \boldsymbol{H} \equiv R_+^{I+IJ+KI+I+J+I}$, 使得

$$\langle \boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}^*), \boldsymbol{X}-\boldsymbol{X}^*\rangle \geqslant 0, \forall \boldsymbol{X} \in \boldsymbol{H}. \tag{17}$$

其中$\boldsymbol{X} \equiv (\boldsymbol{q}^{\mathrm{NEW}}, \boldsymbol{Q}_1, \boldsymbol{Q}_2, \boldsymbol{P}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\lambda}), \boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}) \equiv (F_{1i}, F_{2ij}, F_{3ki}, F_{4i}, F_{5j}, F_{6i}), \forall i, j$. $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X})$中各个分量分别为式(16)中各乘号前面部分构成的函数, $\langle \boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}^*), \boldsymbol{X}-\boldsymbol{X}^*\rangle$表示$N$维欧式空间内积.

3.2　闭环供应链网络层间交易价格的确定

对于闭环供应链网络均衡决策模型中的价格内生变量ρ_{ij}、ρ_{ki}, 可利用前述变分不等式模型求其均衡值ρ_{ij}^*、ρ_{ki}^*. 若$q_{ij}^* > 0$, 由式(4)可得$\rho_{ij}^* = \dfrac{\partial c_{ij}(q_{ij}^*)}{\partial q_{ij}} + P_i^*\dfrac{\partial \mathrm{CE}_i}{\partial q_{ij}} - b_i\dfrac{\partial \Delta\mathrm{CE}_i}{\partial q_{ij}} + \lambda_i^*$, 或等价的由式(11) 得$\rho_{ij}^* = \rho_j^* + h_j^- - \dfrac{\partial f_j(\boldsymbol{Q}_1^*)}{\partial q_{ij}} - (\rho_j^* + h_j^+ + h_j^-)G_j(q_j, \rho_j^*)$. 同理, 若$q_{ki}^* > 0$, 由式(4)和式(15)可得$\rho_{ki}^* = u\lambda_i^* - \dfrac{\partial f_i^R(\boldsymbol{Q}_2^*)}{\partial q_{ki}} - P_i^*\dfrac{\partial \mathrm{CE}_i}{\partial q_{ki}} + b_i\dfrac{\partial \Delta\mathrm{CE}_i}{\partial q_{ki}}$, 或$\rho_{ki}^* = c_{ki}(q_{ki}^*)$.

3.3　闭环供应链网络均衡决策模型的算法

文中采用修正投影算法对式(16)进行求解, 修正投影算法与二次逼近的预测校正法[31]、拟牛顿算法[32]相比, 算法设计简单, 能够对连续凸集上的变分不等式进行求解, 并能获得包含Lagrange乘子的所有决策变量[33], 因此能够满足式(16)的求解要求. 修正投影算法的具体步骤如下.

步骤1　初始化. 设定初始值$\boldsymbol{X}^0 \in \boldsymbol{H}$, 令迭代次数$s = 1$, 且收敛标准$\phi > 0$以及步长$\alpha$, 满足$0 < \alpha < 1/L$, 其中$L$是Lipschitz 常数.

步骤2　迭代计算. 通过变分不等式$\left\langle (\overline{\boldsymbol{X}}^{\boldsymbol{s}} + \alpha \boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}^{\boldsymbol{s-1}}) - \boldsymbol{X}^{\boldsymbol{s-1}})^T, \boldsymbol{X} - \overline{\boldsymbol{X}}^{\boldsymbol{s}}\right\rangle \geqslant 0, \forall \boldsymbol{X} \in \boldsymbol{H}$求解$\overline{\boldsymbol{X}}^{\boldsymbol{s}}$.

步骤3 投影计算. 通过变分不等式$\left\langle \left(\boldsymbol{X^s}+\alpha\boldsymbol{F}(\overline{\boldsymbol{X}}^{\boldsymbol{s}})-\boldsymbol{X^{s-1}}\right)^T, \boldsymbol{X}-\boldsymbol{X^s}\right\rangle \geqslant 0, \forall \boldsymbol{X}\in \boldsymbol{H}$求解$\boldsymbol{X^s}$.

步骤4 收敛性保证. 若Max$\| \boldsymbol{X}^s-\boldsymbol{X^{s-1}} \| \leqslant \phi$, 则退出循环; 否则$s=s+1$, 返回步骤2.

4 算例分析

根据修正投影算法, 文中编写了基于Matlab的应用程序. 算法中参数α设置为0.03, ϕ设置为10^{-8}. 考虑一典型的情景, 市场上存在一个由2个制造商(制造商1和制造商2)、2个零售商(零售商1和零售商2)和2个需求不确定市场(需求市场1和需求市场2)构成的闭环供应链网络, 由于文中研究的闭环供应链网络组成部分与文献[34, 35]相同, 因此, 文中参照文献[34, 35], 并将各决策者成本函数及其相关参数定义如下

$$f_1^{\mathrm{NEW}}(\boldsymbol{q}^{\mathrm{NEW}})=2(q_1^{\mathrm{NEW}})^2+0.1q_1^{\mathrm{NEW}}q_2^{\mathrm{NEW}}+0.2q_1^{\mathrm{NEW}},$$

$$f_2^{\mathrm{NEW}}(\boldsymbol{q}^{\mathrm{NEW}})=2(q_2^{\mathrm{NEW}})^2+0.1q_1^{\mathrm{NEW}}q_2^{\mathrm{NEW}}+0.4q_2^{\mathrm{NEW}},$$

$$f_1^R(\boldsymbol{Q_2})=1.5(\sum_{k=1}^{2}q_{k1})^2+0.1\sum_{k=1}^{2}q_{k1}\sum_{k=1}^{2}q_{k2}+0.1\sum_{k=1}^{2}q_{k1},$$

$$f_2^R(\boldsymbol{Q_2})=1.5(\sum_{k=1}^{2}q_{k2})^2+0.1\sum_{k=1}^{2}q_{k1}\sum_{k=1}^{2}q_{k2}+0.2\sum_{k=1}^{2}q_{k2},$$

$$f_j(\boldsymbol{Q}_1)=0.1(\sum_{i=1}^{2}q_{ij})^2, c_{ij}(q_{ij})=0.1{q_{ij}}^2+2q_{ij}, c_{ki}(q_{ki})=0.5(q_{ki})^2+q_{ki},$$

$$i=1,2; j=1,2; k=1,2.$$

假设零售商j对应的市场k需求函数服从均匀分布, 分布区间为$[0,b_j/\rho_j], b_j>0, j=1,2$, 则有$G_j(x,\rho_j)=x\rho_j/b_j$, $g_j(x,\rho_j)=\rho_j/b_j$, $d_j=\mathrm{E}(d_j)=b_j/2\rho_j$, 其中令$b_j=20$. 初始值设定为$h_j^+=0.1, h_j^-=0.2, j=1,2, u=0.8$, 其它变量初始值均设置为1.

(1)考虑碳限额与碳税构成的复合碳减排政策, 分析不同碳限额对闭环供应链网络均衡状态的影响, 并探讨不同碳限额对碳税的影响, 具体结果如表1所示; (2)基于碳限额与碳税并考虑碳补贴, 依次改变b_j值(表示市场不同的需求规模), b_j=19, 20, 21, 且j=1, 2, 并分别灵敏度分析碳补贴b_i对网络均衡状态的影响. 其中, 制造商的碳限额为$A_i=1.5$, 且i =1, 2, 其它变量初始值不变, 具体结果见图2至图11.

4.1 碳限额对闭环供应链网络均衡状态的影响

探索碳限额对网络均衡状态的影响时, 文中设定政府部门没有实施碳补贴($b_i=0$). 由表1可得在严格碳限额规制下, 最优碳税能够确保网络均衡状态下制造商的碳排放量不会超过政府部门规制的限额, 但碳限额约束对企业经济收益具有负面影响. 具体分析为, 当2个制造商的碳限额为$A_i=1.5, i=1,2$时, 可得2个制造商的碳排放量分别为$\mathrm{CE}_1=1.5$和$\mathrm{CE}_2=1.5$, 它们均等于碳限额值. 由于政府部门规制2个制造商的碳限额过低, 2个制造商被征收的碳税最优值均大于零, 分别为1.366 2和1.353 2. 若制造商2 碳限额提高为$A_2=3$, 制造商2新产品、再制造产品量以及废旧产品回收量均得到了提高, 其碳排放量增为$\mathrm{CE}_2=2.647\,8$, 但仍小于政府部门规制的碳限额, 制造商2被征收的碳税最优值为0. 在这种情况下, 制造商2拥有足够的碳限额竞争优势, 可通过提高回收价格增加废旧产品回收量、降低批发价提高产品批发量的方式来提高其利润, 这将引致闭环供应链网络同层竞争者制造商1减少新产品和再制造产品的产量以及废旧产品回收量, 导致制造商1利润下降. 这主要是严格的碳限额约束损害了制造商1的经济收益. 此外, 制造

商2碳排放量、利润随其碳限额降低而下降, 这表明企业环境绩效与经济收益存在冲突, 为实现设定的环境目标需要放弃部分经济收益.

在相对宽松碳限额规制下, 碳限额与碳税构成的复合碳减排政策对碳排放调控作用失灵. 当同时放宽两个制造商的碳限额$A_i = 3, i = 1, 2$时, 可得两个制造商的碳排放量分别为$\mathrm{CE}_1 = 2.180\,5 < 3$和$\mathrm{CE}_2 = 2.092\,3 < 3$, 则两个制造商不征收碳税, 这时网络均衡状态与无碳限额规制的均衡状态相一致, 这表明宽松的碳限额规制对网络成员的碳排放决策没有影响.

表 1　碳限额对闭环供应链网络均衡的影响

Table 1　The effect of the carbon limit on the network equilibrium of closed loop supply chain

网络均衡态	碳限额		
	$A_i = 1.5$	$A_i = 1.5$	$A_i = 3$
	$A_i = 1.5$	$A_i = 3$	$A_i = 3$
$(q_i^{\mathrm{NEW}*})_{1\times 2}$	$\begin{pmatrix} 0.462\,1 & 0.417\,7 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.450\,5 & 0.596\,8 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.604\,8 & 0.554\,7 \end{pmatrix}$
$(q_{ij}^*)_{2\times 2}$	$\begin{pmatrix} 0.359\,0 & 0.359\,0 \\ 0.356\,5 & 0.356\,5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.358\,4 & 0.358\,4 \\ 0.621\,6 & 0.621\,6 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.518\,2 & 0.518\,2 \\ 0.495\,8 & 0.495\,8 \end{pmatrix}$
$(q_{ki}^*)_{2\times 2}$	$\begin{pmatrix} 0.267\,0 & 0.289\,4 \\ 0.052\,9 & 0.079\,8 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.332\,7 & 0.807\,9 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.317\,0 & 0.320\,2 \\ 0.222\,4 & 0.225\,9 \end{pmatrix}$
$(\rho_{ij}^*)_{2\times 2}$	$\begin{pmatrix} 6.894\,6 & 6.894\,6 \\ 6.894\,6 & 6.894\,6 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 4.956\,5 & 4.956\,5 \\ 4.956\,5 & 4.956\,5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 4.778\,5 & 4.778\,5 \\ 4.778\,5 & 4.778\,5 \end{pmatrix}$
$(\rho_{ki}^*)_{2\times 2}$	$\begin{pmatrix} 0.302\,6 & 0.331\,3 \\ 0.054\,3 & 0.083\,0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.3881 & 1.134\,2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.367\,2 & 0.371\,5 \\ 0.247\,1 & 0.251\,4 \end{pmatrix}$
$(\rho_j^*)_{1\times 2}$	$\begin{pmatrix} 13.975\,4 & 13.975\,4 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 10.205\,0 & 10.205\,0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 9.862\,5 & 9.862\,5 \end{pmatrix}$
$(P_i^*)_{1\times 2}$	$\begin{pmatrix} 1.366\,2 & 1.353\,2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.411\,5 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \end{pmatrix}$
$(\pi_i^*)_{1\times 2}$	$\begin{pmatrix} 0.619\,51 & 0.506\,97 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.597\,72 & 0.536\,21 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.248\,4 & 1.073\,4 \end{pmatrix}$
$(\pi_j^*)_{1\times 2}$	$\begin{pmatrix} 2.261\,8 & 2.261\,8 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2.273\,5 & 2.273\,5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2.276\,1 & 2.276\,1 \end{pmatrix}$
$\varPi$	5.650 1	5.680 9	6.874
$(\mathrm{CE}_i^*)_{1\times 2}$	$\begin{pmatrix} 1.500\,0 & 1.500\,0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.500\,0 & 2.647\,8 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2.180\,5 & 2.092\,3 \end{pmatrix}$
$(\lambda_i^*)_{1\times 2}$	$\begin{pmatrix} 3.456\,6 & 3.470\,1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2.473\,3 & 2.832\,2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2.674\,8 & 2.679\,3 \end{pmatrix}$

注: $\varPi$表示闭环供应链网络总利润, 即$\varPi = \sum\limits_{i=1}^{2} \pi_i + \sum\limits_{j=1}^{2} \pi_j$.

4.2　碳补贴对网络均衡状态的影响

由图2至图11可看出随着碳补贴逐步增加, 在不同市场需求$b_j = 19, 20, 21, j = 1, 2$情况下, 闭环供应链网络均衡决策状态均呈现区间性变化趋势.

文中首先考虑$b_j = 20$时的市场需求规模, 在此市场需求规模下, 分析碳补贴变化对闭环网络均衡状态的影响, 具体从以下五个碳补贴区间进行探讨.

1)碳补贴在[1, 1.3]区间时, 网络中制造商新产品产量、与零售商交易量、回收量, 市场需求量, 以及价格变量、碳排放量均保持不变. 这主要是在该区间碳限额与碳税政策起到主导作用, 碳税抵消政府部门碳补贴对网络均衡态的影响. 具体分析为: 当碳补贴在[1, 1.3]区间时, 网络均衡态的碳税均大于零, 能够确保2个制造商的碳排放量均没有超过政府部门规制的限额, 这与文中4.1的结论是一致的; 而对于闭环供应链网络成员的产量、定价等均衡决策变量而言, 可从网络均衡模型进行解释, 模型中政府部门碳补贴与碳税同时且只存在式(16)的前三项, 化简为$(P_i^* + b_i)e_i^{\mathrm{NEW}}$、$(P_i^* + b_i)e_i^R$、$(P_i^* + b_i)e_i$. 随着碳补贴的提高, $(P_i^* + b_i)$值始终等于1.366 2或1.353 2(见表2), 这说明碳补贴在[1, 1.3]区间时, 碳税使得碳补贴对网络均衡决策不产生影响.

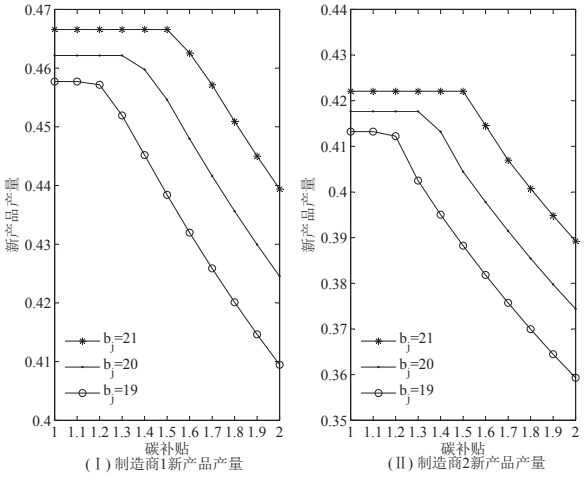

图 2 碳补贴对制造商新产品数量影响

Fig. 2 The effect of carbon subsidies on the number of new products

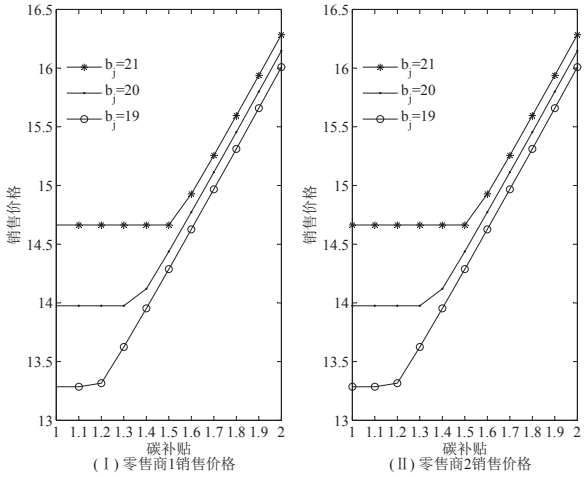

图 3 碳补贴对零售商销售价格影响

Fig. 3 The effect of carbon subsidies on retailer's selling price

表 2 碳补贴对闭环供应链网络均衡状态下碳税的影响

Table 2 The effect of carbon subsidy on carbon tax in the closed-loop supply chain network equilibrium

	$b_i=1$	$b_i=1.1$	$b_i=1.2$	$b_i=1.3$	$b_i=1.4$	$b_i=1.5$	$b_i=1.6$	$b_i=1.7$	$b_i=1.8$	$b_i=1.9$	$b_i=2$
$(P_i)_{2\times1}$	$\begin{pmatrix}0.366\,2\\0.353\,2\end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix}0.266\,2\\0.253\,2\end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix}0.166\,2\\0.153\,2\end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix}0.066\,2\\0.053\,2\end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix}0.008\,3\\0\end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix}$

2)碳补贴在[1, 1.3]区间时, 网络均衡状态下制造商碳排放量保持不变, 而其利润却随碳补贴的提高而增加. 这是由于较低的碳补贴政策通过降低制造商碳税成本的方式, 间接促进制造商经济效益的提高. 因此, 政府部门实施较低碳补贴政策, 只会使制造商单方面受益, 对环境绩效的改善却没有影响.

3)碳补贴在[1.4, 2]区间时, 制造商新产品产量、交易量、回收量、回收价格随着碳补贴的提高下降, 而零售商采购价格、销售价格却增加. 这主要是在该区间碳补贴起到了主导作用, 致使碳税趋于零. 随着碳补贴提高, 制造商更倾向于降低产量、交易量以及以更低的回收价格回收更少的废旧产品, 进而提高碳减排量, 增加碳补贴收入. 同时, 由需求价格规律可知, 交易量的减少将导致零售商产品采购价格上升, 并引致其提高销售价格来弥补因采购费用上涨所带来的利润损失, 因此零售商利润基本保持不变.

4)碳补贴在[1.4, 2]区间时, 制造商1、制造商2以及闭环供应链网络的碳减排量和利润将逐渐增加. 其理由是较高的碳补贴不但促使制造商缩减产量降低碳排放, 而且直接弥补了碳减排带来的经济损失. 因此, 政府部门可适当提高碳补贴, 以实现网络成员的环境绩效与经济效益双赢.

5)碳补贴在[1.4, 2]区间时, 网络中消费者利益受损. 这与文中4.1中碳限额与碳税构成的复合碳减排政策相比, 该区间碳补贴能够实现经济效益与环境绩效的双赢, 但此时消费者需支付较高的购买价格以及获得较低的回收价格. 因此, 政府部门在谋求碳补贴政策实现制造商环境绩效与经济效益双赢的过程中, 还需关注碳补贴政策给消费者带来的不利影响.

其次, 对比分析市场不同需求情形$b_j=19,20,21, j=1,2$下碳补贴变化对网络均衡状态影响, 本文从三个方面进行分析, 具体探讨如下.

在不同碳补贴区间, 市场需求变动对制造商产量、定价等决策变量的影响不同. 在较低的碳补贴区间, 由于碳限额对制造商碳排放限制的缘故, 市场需求波动对制造商新产品产量、交易量以及回收量决策影响不大; 而在较高的碳补贴区间, 市场需求波动对其影响较大, 制造商的产量、定价等决策变量需随市场需求波动做出相应的调整, 才能获得网络均衡状态下最优利润, 但此时其碳排放量随之发生变化.

在较低的碳补贴区间, 零售商的销售价格、采购价格受市场波动影响较大; 而在较高的碳补贴区间, 其

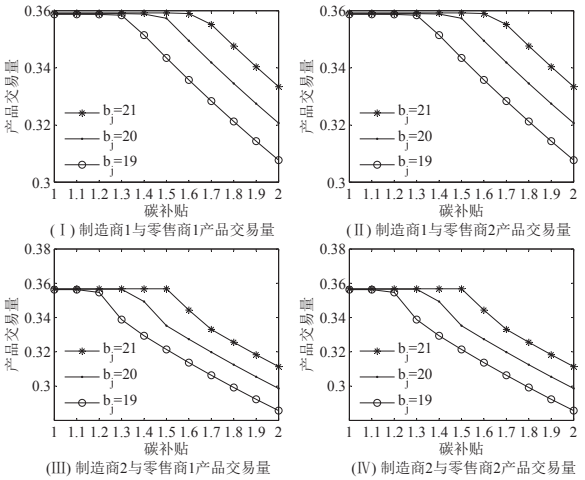

图 4　碳补贴对制造商与零售商产品交易量影响

Fig. 4　The effect of carbon subsidies on the volume of products between manufacturers and retailers

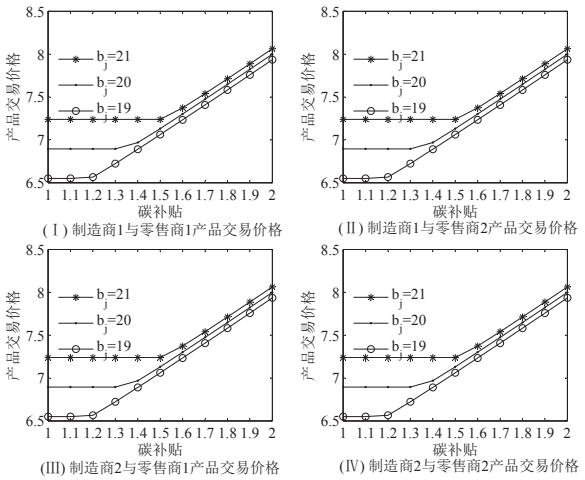

图 5　碳补贴对制造商与零售商产品交易价格影响

Fig. 5　The effect of carbon subsidies on manufacturer and retailer's product transaction price

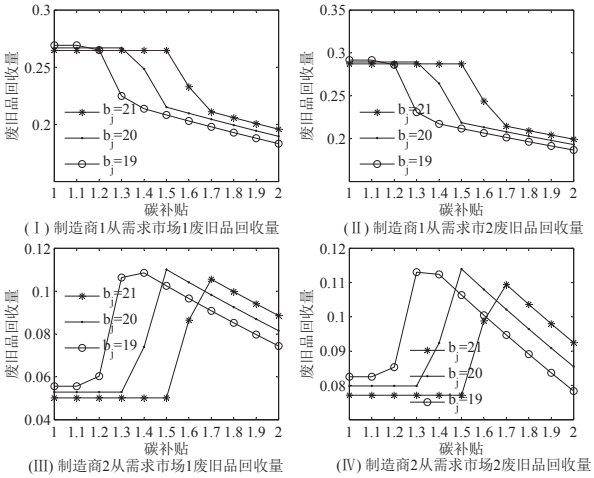

图 6　碳补贴对制造商废旧品回收量影响

Fig. 6　The effect of carbon subsidy on the volume of products between manufacturers and retailers

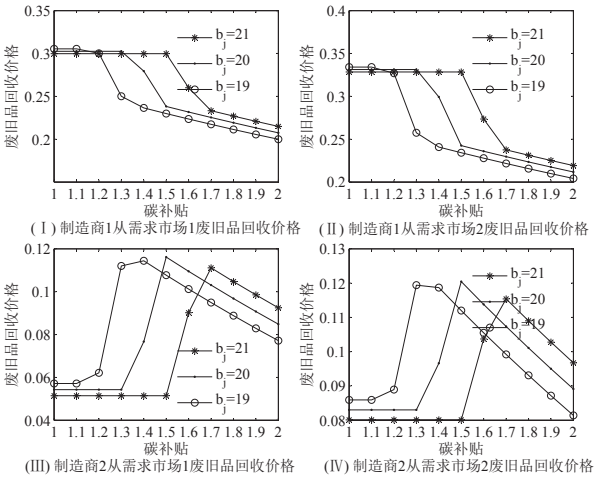

图 7　碳补贴对制造商废旧品回收价格影响

Fig. 7　The effect of carbon subsidy on the recycling price of manufacturers

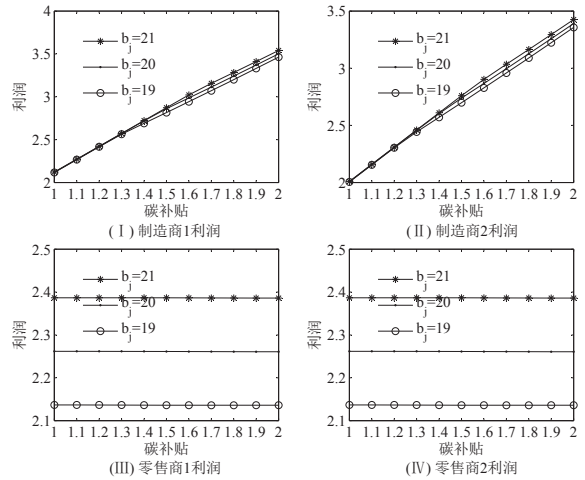

图 8　碳补贴对制造商、零售商利润影响

Fig. 8　The effect of carbon subsidies on manufacturers and retailers

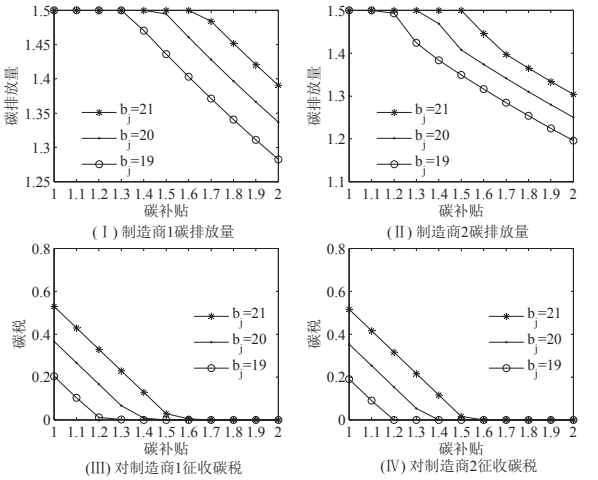

图 9　碳补贴对制造商碳排放量、碳税影响

Fig. 9　The effect of carbon subsidies on carbon emissions and carbon tax

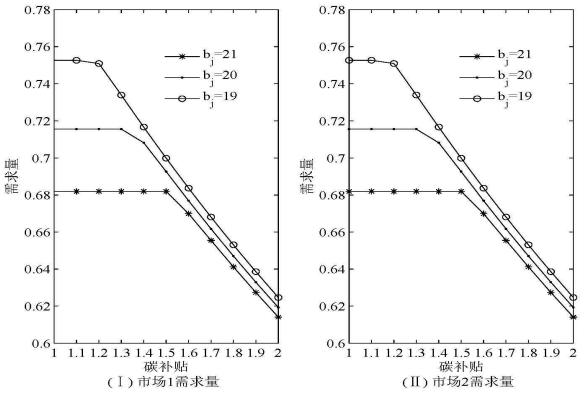

图 10 碳补贴对市场需求量影响

Fig. 10 The effect of carbon subsidies on market demand

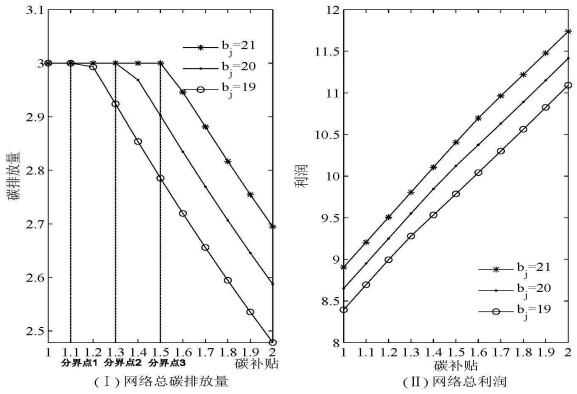

图 11 碳补贴对网络总碳排放量、总利润影响

Fig. 11 The effect of carbon subsidies on total carbon emissions and total profit

注 图11中, 分界点1表示$b_j = 19$时市场需求规模下的高、低碳补贴区间分界点; 分界点2 表示$b_j = 20$时市场需求规模下的高、低碳补贴区间分界点; 分界点3表示$b_j = 21$时市场需求规模下的高低碳补贴区分界点.

受市场波动影响不明显. 这可能是由于零售商的销售价格、采购价格在碳补贴较低区间较低, 在碳补贴较高区间则相对高, 而较低的销售价格和采购价格易受市场需求干扰. 因此, 网络中零售商在应对市场需求波动时, 根据碳补贴实施力度, 分别调整其销售价格和采购价格变动幅度, 可获取均衡状态的最大利润.

市场需求变动导致高、低碳补贴的区间分界点发生变化. 如图11所示, 随着市场需求增加, 高、低碳补贴区间分界点由分界点1增至分界点2和3, 此时政府部门碳补贴政策制定所参考的低区间碳补贴范围扩大、高区间碳补贴范围缩小. 因此, 政府部门在制定碳补贴政策过程中, 需考虑市场需求具有不确定性的这一干扰因素.

5 结束语

本文以复合碳减排政策为背景, 基于市场需求具有不确定性考虑, 建立了闭环供应链网络均衡决策模型, 分析了复合碳减排政策对企业经济绩效和环境绩效的影响, 探索了碳税、碳补贴及碳限额之间的作用机理, 以及市场需求不确定对政府部门政策制定、闭环供应链网络中企业决策行为的影响, 发现较高的碳补贴可同时提高企业的经济效益与环境绩效, 同时企业的经营决策与碳减排政策的制定受到市场需求的影响. 这为企业在应对市场需求变化时的经营决策提供理论依据, 同时也为政府部门碳减排政策的制定提供参考. 本文所建立的模型还可进一步考虑不确定环境下网络成员的风险规避特性, 以及在产品异质情况下消费者对产品的低碳偏好特性, 尽管这些考虑会增加在碳减排政策下对闭环供应链网络均衡决策问题研究的难度, 但这样会更加符合实际.

参考文献:

[1] 张国兴, 高晚霞, 张振华, 等. 产业协同是否有助于提升节能减排的有效性: 基于1 052条节能减排政策的研究. 中国管理科学, 2017, 25(3): 181–189.
Zhang G X, Cao W X, Zhang Z H, et al. Industrial collaboration promote the effectiveness of energy conservation and emission reduction: Based on the research of 1 052 energy. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(3): 181–189. (in Chinese)

[2] 张宏利. 国家助力新能源汽车行业发展补助高达300多亿. http: //www. Carnets. cn/energy/201605/13/2051. Html, 2017–01–05.
Zhang H L. National help the development of new energy automotive industry subsidies up to about 30 billion. http: //www. Carnets. cn/energy/201605/13/2051. Html, 2017–01–05. (in Chinese)

[3] 定 军. 2017年单位生产总值二氧化碳排放量要下降4%. http: //www. china-nengyuan. com/news/105781. html, 2017–03–16.

Ding J. Carbon dioxide emissions per unit of GDP fell by 4% in 2017. http: //www. china-nengyuan. com/news/105781. html, 2017–03–16. (in Chinese)

[4] 周梦鸽. 碳配额政策2017年试点不达标车企面临3倍–5倍罚款. http: //www. Cet. Com. cn/nypd/xny/1822577. shtml, 2016–09–28.
Zhou M G. Carbon quota policy pilot in 2017 is not up to 3–5 times the price of fines. http: //www. Cet. Com. cn/nypd/xny/1822577. shtml, 2016–09–28. (in Chinese)

[5] 王一雷, 朱庆华, 夏西强. 基于消费偏好的供应链上下游联合减排协调契约博弈模型. 系统工程学报, 2017, 32(2): 188–198.
Wang Y L, Zhu Q H, Xia X Q. Supply chain upstream and downstream joint coordination contract game model based on consumer preference. Journal of Systems Engineering, 2017, 32(2): 188–198. (in Chinese)

[6] Nagurney A, Dong J, Zhang D. A supply chain network equilibrium model. Transportation Research, Part E: Logistics & Transportation Review, 2002, 38(5): 281–303.

[7] Nagurney A, Liu Z, Cojocaru M G, et al. Dynamic electric power supply chains and transportation networks: An evolutionary variational inequality formulation. Transportation Research, Part E: Logistics & Transportation Review, 2007, 43(5): 624–646.

[8] Yu M, Nagurney A. Competitive food supply chain networks with application to fresh produce. European Journal of Operational Research, 2013, 224(2): 273–282.

[9] Yang G F, Wang Z P, Li X Q. The optimization of the closed-loop supply network. Transportation Research, Part E: Logistics & Transportation Review, 2009, 45(1): 16–28.

[10] Qiang Q, Ke K, Anderson T, et al. The closed-loop supply chain network with competition, distribution channel investment, and uncertainties. Omega: International Journal of Management Science, 2013, 4(12): 186–194.

[11] 张桂涛, 胡劲松, 王　磊, 等. 考虑消费者渠道偏好的多期闭环供应链网络均衡. 系统工程理论与实践, 2016, 36(2): 347–362.
Zhang G T, Hu J S, Wang L, et al. Multi-period closed-loop supply chain network equilibrium with the consumer's preference for trade channels. Systems Engineering: Theory & Practice, 2016, 36(2): 347–362. (in Chinese)

[12] 张桂涛, 孙　浩, 胡劲松. 考虑库存能力约束的多期闭环供应链网络均衡. 管理工程学报, 2017, 1(31): 176–184.
Zhang G T, Sun H, Hu J S. Multi-aeriod closed-loop supply chain network equilibrium based on constrained inventory. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2017, 1(31): 176–184. (in Chinese)

[13] Qiang Q. The closed-loop supply chain network with competition and design for remanufactureability. Journal of Cleaner Production, 2015, 105: 348–356.

[14] Rezapour S, Farahani R Z, Fahimnia B, et al. Competitive closed-loop supply chain network design with price-dependent demands. Journal of Cleaner Production, 2015, 93: 251–272.

[15] Hammond D, Beullens P. Closed-loop supply chain network equilibrium under legislation. European Journal of Operational Research, 2007, 183(2): 895–908.

[16] 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)

[17] 杨玉香, 黄祖庆. 电子废弃物许可证制度下闭环供应链网络成员企业行为. 系统工程理论与实践, 2016, 36(4): 910–922.
Yang Y X, Huang Z Q. Behavior of member firms in closed-loop supply chain network under e-waste permits system. Systems Engineering: Theory & Practice, 2016, 36(4): 910–922. (in Chinese)

[18] 孙　浩, 张桂涛, 钟永光, 等. 政府补贴下制造商回收的多期闭环供应链网络均衡. 中国管理科学, 2015, 23(1): 56–64.
Sun H, Zhang G T, Zhong Y G, et al. The equilibrium of multi-period closed-loop supply chain network with manufacturer collection channel under government subsidies. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(1): 56–64. (in Chinese)

[19] He Y X, Liu Y Y, Du M, et al. Comprehensive optimisation of China's energy prices, taxes and subsidy policies based on the dynamic computable general equilibrium model. Energy Conversion & Management, 2015, 98(1): 518–532.

[20] Li N, Ma D, Chen W. Projection of cement demand and analysis of the impacts of carbon tax on cement industry in China. Energy Procedia, 2015, 75: 1766–1771.

[21] Wu K, Nagurney A, Liu Z, et al. Modeling generator power plant portfolios and pollution taxes in electric power supply chain networks: A transportation network equilibrium transformation. Transportation Research, Part D: Transport & Environment, 2006, 11(3): 171–190.

[22] Nagurney A, Liu Z, Woolley T. Optimal endogenous carbon taxes for electric power supply chains with power plants. Mathematical and Computer Modelling, 2006, 44(9): 899–916.

[23] 朱 莉. 低碳经济下物流优化设计的网络均衡分析. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(7): 77–83.
Zhu L. A logistics optimization design model under low carbon economy: From network equilibrium perspective. China Population Resources and Environment, 2013, 23(7): 77–83. (in Chinese)

[24] 周 岩, 蒋京龙, 孙 浩, 等. 面向能源和低碳发展的多准则供应链网络均衡. 系统工程学报, 2014, 29(5): 652–661.
Zhou Y, Jiang J L, Sun H, et al. Multi criteria supply chain network equilibrium with energy and low carbon development. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(5): 652–661. (in Chinese)

[25] 马秋卓, 宋海清, 陈功玉. 考虑碳交易的供应链环境下产品定价与产量决策研究. 中国管理科学, 2014, 22(8): 37–46.
Ma Q Z, Song H Q, Chen G Y. Research on product pricing and production decision making under the supply chain environment considering the carbon trading mechanism. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22(8): 37–46. (in Chinese)

[26] Zhang G T, Zhong Y G, Sun H, et al. Multi-period closed-loop supply chain network equilibrium with carbon emission constraints. Resources, Conservation and Recycling, 2015, 104: 354–365.

[27] Kannan G, Hamed S, Devika K. Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. European Journal of Operational Research, 2015, 24(3): 603–626.

[28] 张国兴, 高秀林, 汪应洛, 等. 我国节能减排政策协同的有效性研究: 1997–2011. 管理评论, 2015, 27(12): 3–17.
Zhang G X, Gao X L, Wang Y L, et al. Effectiveness of coordination of energy conservation and emission reduction policies in China: from 1997 to 2011. Management Review, 2015, 27(12): 3–17. (in Chinese)

[29] 竺乾威. 地方政府的政策执行行为分析: 以“拉闸限电”为例. 西安交通大学学报(社会科学版), 2012, 32(2): 40–46.
Zhu Q W. An analysis on the policy implementation behavior of local governments: With“switching out to limit power consumption”as an example. Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences), 2012, 32(2): 40–46. (in Chinese)

[30] Zhao Y, Meng X, Wang S, et al. Buyback contracts with price-dependent demands: Effects of demand uncertainty. European Journal of Operational Research, 2014, 239(3): 663–673.

[31] He B S, Xu Y,Yuan X M. A logarithmic-quadratic proximal prediction-correction method for structured monotone variational inequalities. Computation Optimization and Applications, 2006, 35(1): 19–46.

[32] Taji K, Fukushima M, Lbaraki T. A globally convergent Newton method for solving strongly monotone variational inequalities. Mathematical Programming, 1993, 58(3): 369–383.

[33] Nagurney A, Zhang D. Projected Dynamical Systems and Variational Inequalities with Applications. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.

[34] 杨玉香, 张宝友, 孟丽君, 等. 基于环境责任的闭环供应链网络多准则决策均衡问题. 系统管理学报, 2014, 21(1): 13–20.
Yang Y X, Zhang B Y, Meng L J, et al. Equilibrium problem of multi criteria decision making in closed-loop supply chain network considering environmental responsibility. Journal of Systems & Management, 2014, 21(1): 13–20. (in Chinese)

[35] Dong J, Zhang D, Nagurney A. A supply chain network equilibrium model with random demands. European Journal of Operational Research, 2004, 156(1): 194–212.

作者简介:

程发新 (1966—), 男, 甘肃张掖人, 博士, 教授, 研究方向: 运营管理、群体决策, Email: chengfaxin@163.com;

袁 猛 (1992—), 男, 江苏睢宁人, 硕士生, 研究方向: 物流与供应链管理, Email: yuanmeng_2016@163.com;

孙立成 (1977—), 男, 安徽枞阳人, 博士, 副教授, 研究方向: 碳排放转移分析, Email: sunsee213@ujs.edu.cn;

罗建强 (1973—), 男, 陕西扶风人, 博士, 教授, 研究方向: 服务运作管理, Email: ljq2809@163.com.