

低碳供应链纵向合作减排的动态优化

赵道致, 原白云, 徐春明

(天津大学 管理与经济学部, 天津 300072)

摘要: 基于微分博弈, 研究由一个供应商与一个制造商组成的低碳供应链中纵向合作减排的动态优化问题. 构建了以制造商占主导、供应商跟随的 Stackelberg 微分博弈模型, 分别得到了制造商和供应商的最优反馈均衡策略及各自的利润最优值函数, 推导出产品碳排放量随时间变化的最优轨迹. 通过数值算例分析了制造商和供应商的长期合作减排策略对产品碳排放量的影响, 为供应链上下游企业开展长期减排合作提供了理论依据.

关键词: 低碳; 供应链; 合作减排; 微分博弈; Stackelberg 博弈

中图分类号: C934

文献标志码: A

Dynamic optimization about vertical cooperation on carbon emissions reduction in low-carbon supply chain

ZHAO Dao-zhi, YUAN Bai-yun, XU Chun-ming

(College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China. Correspondent: YUAN Bai-yun, E-mail: yuanbaiyun@163.com)

Abstract: Dynamic optimization about vertical cooperation on carbon emissions reduction is discussed based on the differential game in a low-carbon supply chain consisting of a single supplier and a single manufacturer. Stackelberg differential game models are built under a supply chain in which the manufacturer is a leader and the supplier is a follower. The optimal feedback equilibrium strategy with long-term cooperation of the supplier and the manufacturer about reducing emissions and their own optimal value function of profits can be obtained respectively, and the optimal trajectory of products' carbon emissions also can be found. Finally, through a numerical example, it is analyzed how the long-term cooperation strategies on carbon emissions reduction of manufacturer and supplier affect the carbon emissions of product, and the theoretical basis is provided for long-term emissions reduction vertical cooperation in supply chain.

Key words: low-carbon; supply chain; cooperation on carbon emissions reduction; differential game; Stackelberg game

0 引言

近年来, 国际上已形成了共识: 温室气体排放是导致气候变化的主要原因^[1]. 各国政府及企业都在积极探索减少温室气体排放的解决方案, 目前已有12个国家和地区立法, 要求企业实行碳标签制度, 其中具有代表性的企业有沃尔玛、IBM、宜家等^[2]. 此外, 2013年3月国家发改委发布了《低碳产品认证管理暂行办法》^[3], 明确了中国低碳产品认证体系的主要内容, 进一步从消费端推动企业进行减排技术创新, 努力开发低碳产品. 因此, 在低碳环境下从运营管理角度探讨供应链上下游企业间合作减排问题具有重要的现实意义. 另外, 实践中企业的减排投资效果往往

存在一定的滞后效应, 低碳产品认证证书的有效期为3年, 这都说明企业的减排行为是个长期动态过程, 在动态架构下研究供应链上下游企业间合作减排问题更加贴近现实.

已有文献研究了供应链上下游企业联合减排对其运营产生的影响. Du等^[4-5]分析了排放权依赖型供应链双方的 Stackelberg 博弈过程, 并将政府政策作为可变参数, 引入了公平偏好和社会总福利, 研究了碳排放限制政策对排放权供需双方运营的影响. 陈剑^[6]在对当前供应链管理研究现状综述的基础上, 指出了低碳时代供应链管理值得关注的几个重要方向. 但这类文献没有考虑动态环境下供应链纵向合作减排的

收稿日期: 2013-05-06; 修回日期: 2013-09-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71072155).

作者简介: 赵道致(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流与供应链管理、运营管理、工业工程等研究; 原白云(1983—), 女, 博士生, 讲师, 从事物流与供应链管理、生产运作管理的研究.

问题及减排对产品需求的影响. 有学者采用动态模型研究污染气体排放管制问题. Tidball等^[7]用微分博弈模型探讨了全球多个国家间环境污染博弈的优化控制问题; Jørgensen等^[8]对采用动态博弈方法研究多国家环境污染的经济管理问题的相关文献进行了综述. 但该类文献未从微观角度考虑企业长期减排对需求的影响. 也有学者研究了企业的减排行为对产品需求的影响. Plambeck^[9]通过实证研究证实, 公司自愿披露产品相关的环境信息, 诸如碳排放量等信息, 能增加产品的市场份额和消费者的信任. Liu等^[10]指出环保型厂商采取一些营销手段, 激励非环保消费者转变成环保消费者, 能增加产品的市场需求.

与已有文献不同, 本文在低碳环境下, 考虑需求受产品碳排放量的影响, 借助 Stackelberg 微分博弈模型, 研究了由单个供应商和单个占主导的制造商组成的两级供应链中长期纵向合作减排的动态优化问题, 试图为供应链企业间长期纵向减排合作机制提供理论依据, 以实现供应链长期整体效率的提升.

1 问题描述及符号说明

1.1 问题描述

在低碳环境下, 企业通过申请低碳产品认证向消费者传递产品减排绩效信息. 产品减排绩效的提升不仅要求制造商减排, 而且要求供应商提供低碳化原材料. 为激励供应商积极减排, 制造商将分担供应商一定比例的减排成本. 本文考虑制造商 M 在供应链纵向合作减排中充当领导者, 负责产品总减排(提出最终产品的低碳认证申请), 供应商 S 作为合作减排的跟随者, 负责原材料减排, 制造商 M 分担供应商 S 一定比例的减排成本, 双方寻求长期纵向合作减排.

1.2 符号说明

设 U_M 和 U_S 表示制造商 M 和供应商 S 销售单位产品(原材料)的利润; $Z_M(t)$ 和 $Z_S(t)$ 表示 t 时刻各自的减排努力水平, 是控制变量(决策变量); $x(t)$ 表示 t 时刻产品的碳排放量, 是状态变量, 依赖双方的减排努力水平; $\varphi(t)$ 表示 t 时刻制造商分担供应商减排成本的比例, 是制造商的决策变量; J_M 和 J_S 表示制造商和供应商长期(无限时区内)的总利润.

1.3 基本假设

1) 假设企业减排成本是关于减排努力水平的凸函数, t 时刻制造商 M 和供应商 S 的减排成本为

$$C(Z_M(t), t) = \frac{\mu_M}{2} Z_M^2(t),$$

$$C(Z_S(t), t) = \frac{\mu_S}{2} Z_S^2(t), \quad (1)$$

其中 μ_M 和 μ_S 是制造商和供应商的正减排成本系数.

2) 产品的碳排放量是一个动态变化的过程, 受制

造商和供应商的减排努力水平影响, 产品碳排放量的变化过程可表示为

$$\dot{x}(t) = \gamma x(t) - \alpha Z_M(t) - \beta Z_S(t). \quad (2)$$

其中: $x(t)$ 表示 t 时刻产品的碳排放量, 且初始产品碳排放量 $x(0) = x_0 \geq 0$; $\alpha > 0$, $\beta > 0$ 表示制造商和供应商的减排努力对产品碳排放量的影响系数; $\gamma > 0$ 表示当双方减排努力为零时产品碳排放量的自然增长率. 随着时间的推移, 已有投资的减排设备会老化, 产品碳排放量存在一个自然增长率.

3) 产品的市场需求受产品碳排放量的影响, 文中假设 t 时刻需求与产品碳排放量呈线性关系, 即

$$D(x(t), t) = D_0 + \delta(x_0 - x(t)). \quad (3)$$

其中: $D_0 \geq 0$ 为常数, 表示产品的初始需求; $\delta > 0$ 为产品碳排放对需求的影响系数.

4) 本文主要考虑减排对供应链企业的影响, 不计供应链双方的库存成本和缺货成本, 忽略价格等因素对需求的影响. 假设双方决策基于完全信息, 双方均是理性决策者; 模型中所有参数均为与时间无关的常数(为书写方便, 下文不再列出时间 t).

2 模型构建及求解

从动态角度考虑, 占主导的制造商 M 和跟随的供应商 S 的合作减排决策构成了 Stackelberg 微分博弈. 假定在无限时间长度内, 制造商和供应商在任意时刻均具有相同的贴现因子, 记为 ρ , 双方的目标都是在无限时区内寻求使其利润最大化的最优减排策略. 此时制造商 M 和供应商 S 的利润函数分别为

$$J_M(Z_M, \varphi) = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left[U_M D(x(t)) - \frac{\mu_M}{2} Z_M^2 - \varphi \frac{\mu_S}{2} Z_S^2 \right] dt, \quad (4)$$

$$J_S(Z_S) = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left[U_S D(x(t)) - (1 - \varphi) \frac{\mu_S}{2} Z_S^2 \right] dt. \quad (5)$$

定理 1 在制造商占主导、供应商跟随的供应链长期纵向合作减排模式中, 有:

1) 产品碳排放量的最优轨迹为

$$l: x(t) = \left(x_0 + \frac{\omega}{v} e^{vt} \right) - \frac{\omega}{v}; \quad (6)$$

2) 制造商 M 和供应商 S 二人 Stackelberg 微分博弈的反馈均衡策略为 $((Z_M^*, \varphi^*), Z_S^*)$;

3) 制造商 M 和供应商 S 的利润最优值函数为

$$J_M^*(x(t)) = e^{-\rho t} (a_2^* x^2 + b_2^* x + c_2^*), \quad (7)$$

$$J_S^*(x(t)) = e^{-\rho t} (a_1^* x^2 + b_1^* x + c_1^*). \quad (8)$$

其中

$$v = \frac{2\alpha^2 a_2^*}{\mu_M} + \frac{\beta^2 (2a_2^* + a_1^*)}{\mu_S} + \gamma,$$

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{\alpha^2 b_2^*}{\mu_M} + \frac{\beta^2(2b_2^* + b_1^*)}{2\mu_S}, \\ Z_M^* &= -\frac{\alpha(2a_2^*x + b_2^*)}{\mu_M}, \\ \varphi^* &= \frac{(4a_2^* - 2a_1^*)x + 2b_2^* + b_1^*}{(4a_2^* + 2a_1^*)x + 2b_2^* + b_1^*}, \\ Z_S^* &= -\frac{\beta[(4a_2^* + 2a_1^*)x + 2b_2^* + b_1^*]}{2\mu_S}, \end{aligned}$$

$(a_1^*, b_1^*, c_1^*, a_2^*, b_2^*, c_2^*)$ 满足如下约束方程组:

$$\begin{cases} \rho a_1 = 2\gamma a_1 + \frac{4\alpha^2 a_1 a_2}{\mu_M} + \frac{\beta^2 a_1 (2a_2 + a_1)}{\mu_S}, \\ \rho b_1 = \gamma b_1 - U_S \delta + \frac{2\alpha^2 (a_1 b_2 + a_2 b_1)}{\mu_M} + \frac{\beta^2 (a_1 (b_2 + b_1) + a_2 b_1)}{\mu_S}, \\ \rho c_1 = U_S (D_0 + \delta x_0) + \frac{\alpha^2 b_1 b_2}{\mu_M} + \frac{\beta^2 b_1 (2b_2 + b_1)}{4\mu_S}, \\ \rho a_2 = 2\gamma a_2 + \frac{2\alpha^2 a_2^2}{\mu_M} + \frac{\beta^2 (2a_2 + a_1)^2}{2\mu_S}, \\ \rho b_2 = \gamma b_2 - U_M \delta + \frac{2\alpha^2 a_2 b_2}{\mu_M} + \frac{\beta^2 (2a_2 + a_1)(2b_2 + b_1)}{2\mu_S}, \\ \rho c_2 = U_M (D_0 + \delta x_0) + \frac{\alpha^2 b_2^2}{2\mu_M} + \frac{\beta^2 (2b_2 + b_1)^2}{8\mu_S}. \end{cases} \quad (9)$$

证明 运用逆向归纳法, 首先求解供应商 S 的单方最优控制问题. 根据式 (5), 记 t 时刻之后供应商 S 的总利润现值最优值函数为

$$J_S^*(x) = e^{-\rho t} V_S(x), \quad (10)$$

其中

$$V_S(x) = \max_{Z_S \geq 0} \int_t^\infty e^{-\rho(\tau-t)} \left[U_S D - (1-\varphi) \frac{\mu_S}{2} Z_S^2(\tau) \right] d\tau.$$

$V_S(x)$ 对于所有的 $x \geq 0$ 必须满足如下 HJB 方程:

$$\begin{aligned} \rho V_S(x) &= \max_{Z_S \geq 0} \left[U_S (D_0 + \delta(x_0 - x)) - \frac{\mu_S(1-\varphi)}{2} Z_S^2 + V_S'(x)(\gamma x - \alpha Z_M - \beta Z_S) \right]. \quad (11) \end{aligned}$$

由一阶条件可解得供应商 S 的最优减排策略

$$Z_S^* = -\frac{\beta V_S'(x)}{\mu_S(1-\varphi)}. \quad (12)$$

制造商 M 根据供应商 S 的最优反馈策略 Z_S^* 确定自己的最优策略 (Z_M^*, φ^*) . 记 t 时刻之后制造商 M 的总利润现值最优值函数为

$$J_M^*(x) = e^{-\rho t} V_M(x), \quad (13)$$

其中

$$V_M(x) = \max_{Z_M \geq 0, 0 \leq \varphi \leq 1} \int_t^\infty e^{-\rho(\tau-t)} \left[U_M D - \right.$$

$$\left. \frac{\mu_M}{2} Z_M^2(\tau) - \varphi \frac{\mu_S}{2} Z_S^2(\tau) \right] d\tau.$$

$V_M(x)$ 对于所有的 $x \geq 0$ 必须满足如下 HJB 方程:

$$\begin{aligned} \rho V_M(x) &= \max_{Z_M \geq 0, 0 \leq \varphi \leq 1} \left[U_M (D_0 + \delta(x_0 - x)) - \frac{\mu_M}{2} Z_M^2 - \frac{\mu_S \varphi}{2} Z_S^2 + V_M'(x)(\gamma x - \alpha Z_M - \beta Z_S) \right]. \quad (14) \end{aligned}$$

将式 (12) 代入 (14), 可解得制造商 M 的最优策略为

$$\begin{cases} Z_M^* = -\frac{\alpha V_M'(x)}{\mu_M}, \\ \varphi^* = \frac{2V_M'(x) - V_S'(x)}{2V_M'(x) + V_S'(x)}. \end{cases} \quad (15)$$

将式 (12) 和 (15) 代入 (11) 和 (14), 整理可得

$$\begin{aligned} \rho V_S(x) &= (\gamma V_S'(x) - U_S \delta)x + U_S (D_0 + \delta x_0) + \frac{\alpha^2 V_M'(x) V_S'(x)}{\mu_M} + \frac{\beta^2 V_S'(x) (2V_M'(x) + V_S'(x))}{4\mu_S}, \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho V_M(x) &= (\gamma V_M'(x) - U_M \delta)x + U_M (D_0 + \delta x_0) + \frac{\alpha^2 (V_M'(x))^2}{2\mu_M} + \frac{\beta^2 (2V_M'(x) + V_S'(x))^2}{8\mu_S}. \quad (17) \end{aligned}$$

观察式 (17) 和 (18), 可推测它具有如下形式解:

$$\begin{cases} V_S(x) = a_1 x^2 + b_1 x + c_1, \\ V_M(x) = a_2 x^2 + b_2 x + c_2, \end{cases} \quad (18)$$

其中 $(a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2)$ 均为未知常数. 将式 (18) 及其关于 x 的一阶导数分别代入式 (16) 和 (17), 整理并对比其左右两边的同类项系数, 可得到关于 $(a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2)$ 的约束方程组 (9). 求解该方程组, 可得其解 $(a_1^*, b_1^*, c_1^*, a_2^*, b_2^*, c_2^*)$ (求解及取舍过程略去), 将其代入式 (15) 和 (12), 整理后可得制造商 M 和供应商 S 的反馈 Stackelberg 均衡策略为

$$\begin{cases} Z_M^*(x) = -\frac{\alpha(2a_2^*x + b_2^*)}{\mu_M}, \\ \varphi^*(x) = \frac{(4a_2^* - 2a_1^*)x + 2b_2^* - b_1^*}{(4a_2^* + 2a_1^*)x + 2b_2^* + b_1^*}; \end{cases} \quad (19)$$

$$Z_S^*(x) = -\frac{\beta[(4a_2^* + 2a_1^*)x + 2b_2^* + b_1^*]}{2\mu_S}. \quad (20)$$

将式 (19) 和 (20) 代入 (2), 根据状态方程的边界条件 $x(0) = x_0$, 可求得 $x(t)$ 满足边界条件的解 (即产品碳排放量的轨迹) 如式 (6); 将 $(a_1^*, b_1^*, c_1^*, a_2^*, b_2^*, c_2^*)$ 代入式 (10) 和 (13), 可得制造商和供应商的利润最优值函数分别为式 (7) 和 (8). \square

观察定理 1 中产品碳排放量的最优轨迹 (6), 可得到如下推论:

推论 1 产品碳排放量随时间的变化趋势受参数 v, ω 的影响, 具体趋势如表 1 所示.

表 1 产品碳排放量最优轨迹随时间的变化趋势

| 情况 | 参数范围 | 变化趋势 | 稳定(收敛)性 |
|----|-------------------------------------|------|------------------------------|
| 1 | $v < 0, x_0 + \frac{\omega}{v} > 0$ | 递减 | 收敛(收敛于 $-\frac{\omega}{v}$) |
| 2 | $v > 0, x_0 + \frac{\omega}{v} < 0$ | 递减 | 不收敛(趋于 $-\infty$) |
| 3 | $v < 0, x_0 + \frac{\omega}{v} < 0$ | 递增 | 收敛(收敛于 $-\frac{\omega}{v}$) |
| 4 | $v > 0, x_0 + \frac{\omega}{v} > 0$ | 递增 | 不收敛(趋于 $+\infty$) |

推论 1 蕴含了丰富的管理意义:

1) 当参数满足情况 1 时, 产品碳排放量最优轨迹随时间递减且收敛稳定于某一水平, 反映了供应链长期纵向合作减排绩效随时间的提升, 且存在边际递减效应, 说明企业长期减排效果增幅缓慢; 实践中, 随着减排技术的不断投入, 减排的效果逐渐变弱.

2) 当参数满足情况 2 时, 产品碳排放量最优轨迹随时间递减且趋于 $-\infty$, 反映了供应链长期纵向合作减排绩效的提升, 且存在边际递增效应, 说明企业长期减排增幅效果显著; 实践中, 若企业减排技术容易实现或企业可以通过碳中和抵消产品的碳排放量时, 会出现减排效率的边际递增.

3) 当参数满足情况 3 和情况 4 时, 产品碳排放量最优轨迹随时间递增, 长期下去必然对环境造成不利影响, 在这组参数下, 政府或可采用相关规章制度策略进行干预, 例如, 政府从最大化社会总福利的角度出发, 出台相关的碳排放规章制度政策, 通过政策改变企业的运营参数, 使企业重新作出减排决策.

3 算例分析

下面对供应链长期纵向合作减排进行算例分析. 相关参数值为: $U_M = 10, U_S = 8, \mu_M = 18, \mu_S = 12, \alpha = 0.3, \beta = 0.6, \gamma = 3, \delta = 2, \rho = 0.9, D_0 = 12, x_0 = 1$. 将上述参数值代入模型中, 借助于 Matlab 7.12, 可解得

$$v = -1.53, \omega = 0.62,$$

$$(a_1^*, b_1^*, c_1^*, a_2^*, b_2^*, c_2^*) =$$

$$(-16.73, -67.20, 92.66, -57.48, 46.48, 164.32). \quad (21)$$

将式 (21) 分别代入 (6)、(19) 和 (20), 可得产品碳排放量的最优轨迹

$$l : x(t) = 0.59e^{-1.53t} + 0.41;$$

制造商的反馈策略函数

$$Z_M^*(t) = 1.14e^{-1.53t} + 1.30,$$

$$\varphi^*(t) = 1 - \frac{39.75e^{-1.53t} + 27.15}{156.49e^{-1.53t} + 81.11};$$

供应商的反馈策略函数

$$Z_S^* = 3.91e^{-1.53t} + 2.03.$$

相应函数随时间的变化趋势如图 1 所示.

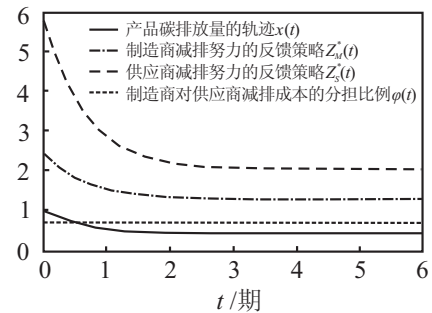


图 1 产品碳排放量及双方均衡策略随时间的变化情况

从图 1 可以得到如下结论:

1) 产品碳排放量、供应链双方的最优减排努力水平均具有时间稳定趋向. 图 1 显示产品的碳排放量随时间收敛于某可控的碳排放量处, 这意味着即使产品的碳排放量受某种干扰(技术误差等)偏离了均衡状态, 随着时间的变化还能返回均衡状态; 制造商和供应商的最优减排努力水平在经过初期的一个较剧烈调整之后, 也收敛于某一努力水平, 反映了该供应链系统的长期减排合作趋于稳定.

2) 供应链减排效果及双方的最优减排努力水平随时间递减. 从产品碳排放轨迹可以看出, 产品的碳排放量随时间的变化逐渐下降, 且单位时间内产品碳排放量下降的幅度随时间递减, 这说明减排效果随时间呈现边际递减; 同时, 制造商和供应商减排努力水平随时间的变化也逐渐减少, 这与实际情况是一致的, 随着减排效果的边际递减, 供应链双方投入的减排努力也相应地减少.

3) 制造商长期稳定分担供应商的减排成本可以激励供应商积极参与产品减排. 对比制造商和供应商的最优减排努力水平可以发现: 在初期, 供应商的减排努力水平高于制造商, 这是制造商分担供应商减排成本的激励效果, 在产品碳排放量较高时, 制造商的激励能促使供应商努力减排, 使产品的碳排放量迅速下降, 初期减排效率较高; 随着时间的变化, 产品自身的碳排放逐渐降低后, 减排较为困难, 而供应商的减排投入始终高于制造商, 积极努力地参与产品的减排活动. 另外, 制造商对供应商减排成本的分担比例随时间变化相对平稳, 制造商长期以某一相对固定比例对供应商的减排成本进行分担, 以激励其长期参与合作减排, 也反映了供应链企业间长期稳定的合作关系有利于该供应链系统的稳定性.

4 结 论

本文探讨了由单个供应商与单个制造商组成的

低碳供应链中纵向合作减排的动态优化问题. 假设需求是产品碳排放量的线性减函数, 构建了制造商占主导、供应商跟随的 Stackelberg 微分博弈模型, 分别得到了双方长期合作减排的最优反馈均衡策略及各自的利润最优值函数, 并推导出产品碳排放量随时间变化的最优轨迹. 最后, 通过算例分析了制造商和供应商的长期减排合作策略及产品碳排放量轨迹随时间的变化趋势, 为供应链上下游企业长期开展减排合作提供了相关的理论依据.

另外, 随着政府对企业碳排放量的限制和碳交易市场的出现, 供应链企业间长期纵向减排合作将会出现新的契机和问题, 这将是下一步的研究内容.

参考文献(References)

- [1] Dinan T. Policy options for reducing CO₂ emissions[R]. Washington DC: The Congress of the United States, Congressional Budget Office, 2008. <http://www.cbo.gov/ftpdocs/89xx/doc8934/02-12-Carbon.pdf>.
- [2] 尹忠明, 胡剑波. 国际贸易中的新课题: 碳标签与中国的对策[J]. 经济学家, 2011, 23(7): 45-53.
(Yin Z M, Hu J B. A new issue in international trade: Carbon labelling and their implications for China[J]. Economist, 2011, 23(7): 45-53.)
- [3] 国家发展改革委, 国家认监委. 关于印发《低碳产品认证管理暂行办法》的通知[EB/OL]. [2013-02-18/2013-03-31]. <http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/2013tz/t20130319-533084.htm>.
(National Development and Reform Commission, CNCA. Notice about issuing "the interim procedures for the low-carbon product certification management"[EB/OL]. [2013-02-18/2013-03-31]. <http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/2013tz/t20130319-533084.htm>.)
- [4] Du S, Ma F, Fu Z, et al. Game-theoretic analysis for an emission-dependent supply chain in a "cap-and-trade" system[J]. Annals of Operations Research, 2011, Published on line, <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-011-0964-6>.
- [5] Du S, Zhu L, Liang L, et al. Emission-dependent supply chain and environment-policy-making in the "cap-and-trade" system[J]. Energy Policy, 2013, 57: 61-67.
- [6] 陈剑. 低碳供应链管理研究[J]. 系统管理学报, 2012, 21(6): 721-728.
(Chen J. Study on supply chain management in a low-carbon era[J]. J of Systems and Management, 2012, 21(6): 721-728.)
- [7] Tidball M, Zaccour G. A differential environmental game with coupling constraints[J]. Optimal Control Applications and Methods, 2009, 30(2): 197-207.
- [8] Jørgensen S, Martín-Herrán G, Zaccour G. Dynamic games in the economics and management of pollution[J]. Environ Model Assess, 2010, 15(6): 433-467.
- [9] Plambeck E L. Reducing greenhouse gas emissions through operations and supply chain management[J]. Energy Economics, 2012, 34(S1): S64-S74.
- [10] Liu Z, Anderson T D, Cruz J M. Consumer environmental awareness and competition in two-stage supply chains[J]. European J of Operational Research, 2012, 218(3): 602-613.

(责任编辑: 李君玲)