doi: 10.11933/j.issn.1007−9289.20170704001

碳交易及补贴政策对再制造闭环供应链的影响

张海咪[1]，刘渤海[1]，李恩重[2]，张　崠[1]，周新远[2]
(1. 合肥工业大学 管理学院，合肥 230009；2. 陆军装甲兵学院 装备再制造技术国防科技重点实验室，北京 100072)

摘　要: 在有政府参与情况下，针对由制造商和零售商组成的两级闭环供应链，建立了由制造商主导的 Stackelberg 博弈模型，得出了不同政策对产品的批发价、零售价、产品的回收率、碳排放总量及供应链利润的影响，并用数值算例进行了验证。结果表明：当碳交易价格与政府补贴力度满足一定条件时，在碳交易与补贴结合政策下，会使得零售价降低、回收率提高、需求量增加、供应链总利润大幅提高，同时碳排放量也有较大幅度的下降。因此同时实行碳交易与政府补贴政策可以弥补单独实行两种政策的不足，有效的降低碳排放量、提高供应链的整体利润，从而使得再制造闭环供应链达到较优状态。

关键词: 再制造；碳交易政策；政府补贴；Stackelberg 博弈
中图分类号: TH17; F274　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1007−9289(2018)01−0165−10

Effects of Carbon Trading and Subsidy Policy on Remanufacturing Closed-loop Supply Chain

ZHANG Hai-mi[1], LIU Bo-hai[1], LI En-zhong[2], ZHANG Di[1], ZHOU Xin-yuan[2]
(1. Management School, Hefei University of Technology, Hefei 230009; 2. National Key Laboratory for Remanufacturing, Army Academy of Armored Force, Beijing 100072)

Abstract: Considering the involvement of the government, a Stackelberg game model led by a manufacturer was developed, according to two levels of closed-loop supply chain composed of a manufacturer and a retailer. The impacts of different policies on product wholesale, retail, product recovery, carbon emissions and supply chain profit were observed and verified by a numerical example. The results show that, when the price of carbon trading and government subsidies satisfy certain conditions, the combination of carbon trading and subsidy policy can reduce the retail price, increase the recovery rate and the demand, significantly improve the total profit of the supply chain, and significantly decrease the carbon emissions. Therefore, the implementation of carbon trading and government subsidy policy can make up for the deficiencies of separating the two policies, reduce carbon emissions and improve the overall profit of the supply chain, making the remanufacturing closed loop supply chain achieve a better condition.

Keywords: remanufacturing; carbon trading policy; government subsidy; Stackelberg game

0　引　言

近些年来，由于温室气体的排放导致我国各地雾霾频发，全球也因为温室气体的排放而导致气候异常，而碳排放被认为是气候异常的主要因素，为减少碳排放，全球各国家纷纷采取了一定的措施来限制碳排放量。国外较早的开始了碳排放限制措施，一些欧洲国家及美国、澳大利亚等国家开始了征收碳税、碳限额、碳交易等措施，

收稿日期：2017-07-04；**修回日期**：2017-12-18
网络出版日期：2018-01-05 13:05；**网络出版地址**：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180105.1305.016.html
通讯作者：刘渤海 (1982—)，男 (汉)，博士，副教授；**研究方向**：运营管理；**E-mail**：leon9991@163.com
基金项目：国家重点研发计划项目 (2017YFF0207905)
Fund：Supported by R & D Program of China (2017YFF0207905)
引文格式：张海咪, 刘渤海, 李恩重, 等. 碳交易及补贴政策对再制造闭环供应链的影响[J]. 中国表面工程, 2018, 31(1): 165-174.
ZHANG H M, LIU B H, LI E Z, et al. Effects of carbon trading and subsidy policy on remanufacturing closed-loop supply chain[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(1): 165-174.

目前已拥有较成熟的交易市场。与国外相比，我国的碳排放政策开始得相对较晚，我国目前仅部分地区实施了碳交易政策，碳税政策还处在摸索中。2013 年 6 月 18 日，我国首个碳排放权交易平台在深圳启动，此后，北京、天津、上海、广东、湖北、重庆等省市也先后启动了碳排放权交易试点。2015 年 9 月，中美两国发表《气候变化联合声明》，我国承诺到 2017 年在全国启动碳排放交易体系。随着各国的碳排放政策的相继实施，低碳理念不断的贯彻，再制造闭环供应链由于其减少环境污染，节约资源消耗，兼顾环境与利益的优点，得到了各位学者广泛关注，各学者主要从碳排放及政府补贴政策对再制造闭环供应链的影响等方面展开了深入的研究。

基于碳排放政策对再制造闭环供应链影响方面的文献较多，如比较 3 种碳排放政策对再制造闭环供应链的影响：Hoen(2010)[1]和 Song 等(2012)[2]分别研究了碳税、碳限额、碳交易 3 种碳排放约束政策对制造商的运输方式选择的影响及对企业最优订货量的影响；Chen 等 (2013)[3]及 Toptal(2014)[4]比较分析了 3 种碳排放政策下的企业投资减排问题，前者研究发现碳限额政策能够有效的促进企业减排，而后者则认为碳交易政策更能有效的降低企业成本和减少碳排放量。再如比较其中两种碳排放政策对再制造闭环供应链的影响：Drake(2010)[5]比较分析了碳税与碳交易机制下的企业减排技术决策行为；常香云等 (2012)[6]比较分析了碳税与碳限额政策下的企业制造/再制造的最优生产决策，研究发现碳限额政策相对较优，当企业设置合理的碳排放限额时可以很好地引导企业选择低碳再制造技术；赵道致等 (2014)[7]研究了在碳限额与碳交易政策下的由制造商和零售商结合的联合减排模式，得到了联合减排模式下两制造商各自的最优减排率和零售商的最优低碳推广程度。还有单独研究某种碳排放政策对再制造闭环供应链影响：马秋卓等 (2014)[8]研究了在政府免费分配的碳排放配额情况下，如何确定其最优碳排放量及其产品最优定价，以使自身利润最大化；岳晓娟 (2013)[9]研究了征收碳税情况下零售商的最优单位产品碳排放和零售价格，并分析了碳敏感系数和碳税税率在定价时对供应链产品的碳排放及零售价格的影响。Hua 等 (2011)[10]研究了碳交易机制下碳价格和碳配额对企业订货策略、碳排放量和总成本的影响。Zhao(2010)[11]等和 Dong(2014)[12]分别研究了在碳交易机制下如何进行减排技术的选择及如何进行上下游企业的协调。

对于政府补贴政策对再制造闭环供应链影响方面，杨春苗等 (2016)[13]与郭成恒等 (2014)[14]研究了政府对制造商的再制造活动进行补贴时对闭环供应链的影响，研究发现政府补贴可以提高企业利润，提高回收率，降低碳排放水平。而徐春秋等 (2014)[15]则以双寡头供应链模型为研究对象，建立了政府补贴下低碳产品和普通产品的产别定价模型，求解得出了两种产品的最优定价策略。研究发现，政府补贴下的差别定价可以实现单独成员的利润最优，无法达到整体供应链利润最优，基于此给出了契约协调机制，来协调分散决策所造成的效率损失。刘渤海等 (2012)[16]研究了不同竞争环境下再制造企业利润的影响因素，并进一步研究了再制造企业的补贴政策，结合前面的分析给出了再制造企业的补贴力度与盈利空间。周占峰 (2012)[17]研究了在政府补贴背景下再制造逆向物流系统定价问题。朱庆华等 (2011)[18]研究了政府补贴及产品的绿色程度对供应链的影响，在不同的博弈阶段分别确定了产品的补贴系数、产品的绿色度水平及产品的价格，并用数值进行了仿真。Webster 等 (2008)[19]研究了政府对制造商进行补贴、对再制造商进行补贴以及对两者同时补贴时对再制造活动的激励作用，研究发现，对两者共同进行补贴时，更能促进废旧产品的回收率。

综上可见，目前关于再制造闭环供应链研究大多关注于研究碳排放政策对再制造闭环供应链的影响，或单独研究政府补贴政策对再制造闭环供应链定价的影响，少有将碳排放政策与政府补贴政策结合起来研究其对再制造闭环供应链的影响，因此，文中将碳交易政策与政府补贴政策结合起来研究其对再制造闭环供应链的影响。

1 问题描述

建立由单一制造商和单一零售商组成的闭环供应链。其中制造商负责制造新产品和再制造品，零售商负责零售并从消费者手中回收旧产品。考虑 4 种情况：①无政府约束政策 (模式 1)；②碳交易政策，政府设定一个总排放限额 E，当

不足或有剩余时，以 L 的价格进行交易 (模式 2)；③政府补贴政策，为促进回收，政府会给零售商提供一定补贴，政府提供的补贴力度为 S(模式 3)；④同时实行碳交易与政府补贴政策 (模式 4)。

1.1　符号说明

c_m：制造商使用原材料生产新产品的单位成本；

c_r：制造商使用回收品生产再制造产品的单位成本；

Δ：制造商生产再制造品比生产新产品节约的单位成本 ($\Delta=c_m-c_r>0$)；

c_0：零售商从消费者回收产品所支付的价格；

c_1：制造商从零售商手中收回旧产品所支付的价格 ($c_0<c_1<\Delta$)；

c_2：零售商因回收产品所获得收益 ($c_2=c_1-c_0>0$)；

S：政府对零售商回收单位产品的补贴力度；

E：政府免费给予企业碳排放量的最大限额；

L：单位碳交易价格；

ω：产品的批发价，为制造商的决策变量；

p：产品的零售价，为零售商的决策变量；

ε：产品的回收率，即再制造产品占需求的比例，为零售商的决策变量；政府给定的最低回收率为 ε_0；

$D(p)=\alpha-\beta p$为产品的需求函数，$\alpha(\alpha>0)$ 表示市场的潜在需求，$\beta(\beta>0)$ 为市场需求对价格的敏感系数，β 反应需求量对价格变动的反应程度；

e：生产新产品的单位碳排放量；

V_i：第 i 种模式下的碳排放总量；

π_j^i：模式 i 时 j 的利润函数，其中 i=1, 2, 3, 4 分别为无政策、碳交易政策、政府补贴政策及同时实行两种政策，j=M 和 R 分别为制造商和零售商。

1.2　模型假设

假设 1：回收的产品可全部用于再制造，生产的再制造品与新产品的质量和功能完全相同，消费者对两种产品的认可度相同，且两种产品的零售价和批发价完全相同。

假设 2：ε 表示产品的回收率，它与零售商的投资量相关，参考 Savaskan[20]等的研究，可以表示为$\varepsilon=\sqrt{I/k}$，I 为零售商进行回收活动时的投入成本，k 是回收活动的成本参数。

假设 3：政府补贴是为了保证能够达到一定的回收水平，政府设定一个最初的目标回收率 ε_0，当未达到目标回收率时，会受到政府的惩罚，超过目标回收率时，受到相应的奖励。

假设 4：生产产品时，生产新产品的单位碳排放量为 e，而生产再制造品的碳排放量远低于生产新产品的碳排放量且政府对制造商生产再制造品往往采取激励政策，因此可假设碳排放配额中不包括再制造品的碳排放量，在此假设再制造产品的碳排放量为 0。

假设 5：建立由制造商和零售商组成的两级供应链，制造商和零售商的决策过程构成一个单周期的 Stackelberg 博弈，其中制造商是博弈的领导者，零售商是博弈的追随者，在分散决策时两方均按各自利益最大化来决策。

2　再制造闭环供应链定价决策模型

2.1　无政府约束政策

制造商和零售商的决策过程组成斯坦克尔伯格博弈，制造商以批发价将产品批发给零售商，零售商以零售价出售给消费者，并负责从消费者手中回收旧产品，从而形成闭环供应链。在此种模式下制造商和零售商的利润函数如下：

$$\pi_{\mathrm{M}}(\omega)=[\omega-c_m+\varepsilon(\Delta-c_1)]D(p) \tag{1}$$

$$\pi_R(\varepsilon,p)=[p-\omega+\varepsilon c_2]D(p)-k\varepsilon^2 \tag{2}$$

2.2　碳交易政策

在碳交易政策下，政府首先给予一定额度 (E) 的免费碳排放量，当高于或低于免费额度 E 时，制造商可以以 L 的价格进行交易。在此模式下，制造商和零售商的利润函数如下：

$$\pi_M(\omega)=[\omega-c_m+\varepsilon(\Delta-c_1)]D(p)-L[e(1-\varepsilon)D(p)-E] \tag{3}$$

$$\pi_R(\varepsilon,p)=(p-\omega+\varepsilon c_2)D(p)-k\varepsilon^2 \tag{4}$$

2.3　政府补贴政策

在政府补贴政策下，政府为达到一定的回收率会事先给定目标回收率 ε_0，当高于或低于这一目标回收率时，政府会给与零售商力度为 S 的奖励或惩罚。在此种模式下，制造商和零售商的利润函数为：

$$\pi_{\mathrm{M}}(\omega)=[\omega-c_m+\varepsilon(\Delta-c_1)]D(p) \tag{5}$$

$$\pi_R(\varepsilon,p)=(p-\omega+\varepsilon c_2)D(p)-k\varepsilon^2+S(\varepsilon-\varepsilon_0) \tag{6}$$

2.4 碳交易与政府补贴政策

在碳交易和政府补贴政策下，政府会给予一定额度的免费碳排放量，当高于或低于给定额度时，制造商之间可以进行交易；同时政府会给达到目标回收率的零售商进行补贴，在此种模式下制造商与零售商的利润函数为：

$$\pi_M(\omega)=[\omega-c_m+\varepsilon(\Delta-c_1)]D(p)-L[e(1-\varepsilon)D(p)-E] \tag{7}$$

$$\pi_R(\varepsilon,p)=(p-\omega+\varepsilon c_2)D(p)-k\varepsilon^2+S(\varepsilon-\varepsilon_0) \tag{8}$$

在建立的 Stackelberg 博弈中，制造商为博弈的领导者，零售商为跟随者。因此决策时，制造商先进行决策，零售商根据制造商的决策结果再进行决策。文中采用逆向归纳法来求解模型，求解结果见表 1。

为简化公式，将一些公式合并如下：

(1) $A_1=\alpha-\beta c_m>0$,

$A_2=\alpha-\beta(c_m+Le)>0$

(2) $B_1=\Delta-c_1+c_2>0$,

$B_2=\Delta-c_1+c_2+Le<0$,

$B_3=4k-\beta c_2(\Delta-c_1+c_2)>0$,

$B_4=4k-\beta c_2(\Delta-c_1+c_2+Le)>0$,

$B_5=4k+\beta(\Delta-c_1-c_2)(\Delta-c_1+c_2)>0$,

$B_6=4k+\beta(\Delta-c_1-c_2+Le)(\Delta-c_1+c_2+Le)>0$

(3) $D_1=4k-\beta c_2{}^2>0, D_2=4k+\beta c_2{}^2>0$

表 1 4 种决策的均衡解

Table 1 Equilibrium solutions of the four kinds of decision

Parameters	No government restraint policy	Government subsidy policy
ω	$\frac{\alpha}{\beta}-\frac{D_1A_1}{2\beta B_3}$	$\frac{\alpha}{\beta}-\frac{D_1(2kA_1-\beta S c_2)+\beta S(\Delta-c_1)D_2}{4k\beta B_3}$
p	$\frac{\alpha}{\beta}-\frac{kA_1}{\beta B_3}$	$\frac{\alpha}{\beta}-\frac{2kA_1+\beta S B_1}{2\beta B_3}$
ε	$\frac{c_2A_1}{2B_3}$	$\frac{c_2A_1+2S}{2B_3}+\frac{S}{4k}$
$D(p)$	$\frac{kA_1}{B_3}$	$\frac{2kA_1+\beta S B_1}{2B_3}$
π_M	$\frac{kA_1{}^2}{2\beta B_3}$	$\frac{(2kA_1+\beta S B_1)^2}{8k\beta B_3}$
π_R	$\frac{kA_1{}^2D_1}{4\beta B_3^2}$	$\frac{A_1D_1(kA_1+\beta S B_1)+\beta S^2B_5]}{4\beta B_3^2}+\frac{3S^2}{16k}-S\varepsilon_0$
V_e	$\frac{keA_1(2B_3-c_2A_1)}{2B_3^2}$	$\frac{e[(4k-S)B_3-2kc_2A_1-4kS](2kA_1+\beta S B_1)}{8kB_3^2}$
Parameters	Carbon trading policy	Government subsidy and carbon trading policy
ω	$\frac{\alpha}{\beta}-\frac{D_1A_2}{2\beta B_4}$	$\frac{\alpha}{\beta}-\frac{D_1(2kA_2-\beta S c_2)+\beta S(\Delta-c_1+Le)D_2}{4k\beta B_4}$
p	$\frac{\alpha}{\beta}-\frac{kA_2}{\beta B_4}$	$\frac{\alpha}{\beta}-\frac{2kA_2+\beta S B_2}{2\beta B_4}$
ε	$\frac{c_2A_2}{2B_4}$	$\frac{c_2A_2+2S}{2B_4}+\frac{S}{4k}$
$D(p)$	$\frac{kA_2}{B_4}$	$\frac{2kA_2+\beta S B_2}{2B_4}$
π_M	$\frac{kA_2{}^2}{2\beta B_4}+LE$	$\frac{(2kA_2+\beta S B_2)^2}{8k\beta B_4}+LE$
π_R	$\frac{kA_2{}^2D_1}{4\beta B_4^2}$	$\frac{D_1A_2(kA_2+\beta S B_2)+\beta S^2B_6}{4\beta B_4{}^2}+\frac{3S^2}{16k}-S\varepsilon_0$
V_e	$\frac{keA_2(2B_4-c_2A_2)}{2B_4^2}$	$\frac{e(2kA_2+\beta S B_2)[(4k-S)B_4-2kc_2A_2-4kS)}{8kB_4{}^2}$

3 结果比较分析

对前一部分所得的各个变量进行比较，为保证所建立的模型有意义，每种情况下的回收率均满足：0≤ε≤1。

命题 1: 碳交易政策与无政府约束政策相比，有如下结论：

(1) $c_2A_1>B_3$时，

$p_1>p_2, \varepsilon_1<\varepsilon_2, D(p)_1<D(p)_2$

(2) 当$c_2A_1<B_3$时，

$p_1<p_2, \varepsilon_1>\varepsilon_2, D(p)_1>D(p)_2$

由命题 1 可知，当满足$c_2A_1>B_3$时，碳交易政策会降低零售价，提高回收率，提高需求量；

反之，碳交易会提高零售价，降低回收率，降低市场需求量。

证明：将无政府约束政策下与碳交易情况下得到的均衡解相减可以得到：

$$\begin{cases} p_1 - p_2 = \dfrac{k\beta Le(c_2A_1 - B_3)}{\beta B_3 B_4} \\ \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \dfrac{\beta c_2 Le(B_3 - c_2A_1)}{2B_3 B_4} \end{cases}$$

由 $0 \leqslant \varepsilon_1 \leqslant 1$，$0 \leqslant \varepsilon_2 \leqslant 1$，可得到，$B_3 > 0$，$B_4 > 0$，再由已知 $k > 0$，$\beta > 0$，$L > 0$，$e > 0$，$c_2 > 0$ 因此上式计算结果取决于 c_2A_1 与 B_3 之间的大小，当 $c_2A_1 > B_3$ 时，$p_1 > p_2$，$\varepsilon_1 < \varepsilon_2$，再由 $D = \alpha - \beta p$ 得 $D(p)_1 < D(p)_2$；当 $c_2A_1 < B_3$ 时，$p_1 < p_2$，$\varepsilon_1 > \varepsilon_2$，再由 $D = \alpha - \beta p$ 得 $D(p)_1 > D(p)_2$。

命题 1 说明，在碳交易情况下由于价格敏感系数 β 取值的不同，碳交易政策会产生不同的影响，当 $\beta \leqslant \dfrac{c_2\alpha - 4k}{c_m - \Delta + c_0}$ 时，碳交易政策会降低产品 (包括再制造品与新品) 的销售价格，提高产品的回收再制造率，提高市场需求；当 $\beta > \dfrac{c_2\alpha - 4k}{c_m - \Delta + c_0}$ 时，碳交易政策会提高产品 (包括再制造品与新品) 的销售价格，降低产品的回收再制造率，降低市场需求。

命题 2：政府补贴政策与无政府约束政策相比，有如下结论：

$$P_1 > P_3，\ \varepsilon_1 > \varepsilon_3，\ D(p)_1 < D(p)_3$$

由命题 2 可知与无政府约束政策相比，政府补贴政策会降低零售价，提高回收率，扩大市场需求量。

证明：将无政府约束政策下和政府补贴政策下得到的均衡解相减可以得到：

$$\begin{cases} p_1 - p_3 = \dfrac{\beta S B_1}{2\beta B_3} \\ \varepsilon_1 - \varepsilon_3 = \dfrac{-S}{B_3} - \dfrac{S}{4k} \end{cases}$$

由 $0 \leqslant \varepsilon_1 \leqslant 1$，$0 \leqslant \varepsilon_3 \leqslant 1$，可得到 $B_3 > 0$；由 $c_0 < c_1 < \Delta$ 及 $k > 0$，$\beta > 0$，$S > 0$ 等条件可以得到 $p_1 - p_3 > 0$，$\varepsilon_1 - \varepsilon_3 < 0$ 因此 $p_1 > p_3$，$\varepsilon_1 < \varepsilon_3$ 再由 $D = \alpha - \beta p$ 得 $D(p)_1 < D(p)_3$。

综合命题 1 和命题 2 可以发现，在碳交易情况下，由于 β 取值的不同，碳交易可能会提高产品销售价格，降低产品的回收再制造率，降低市场需求。而政府补贴机制可以提高回收率，降低零售价，提高市场需求率，政府补贴政策和碳交易政策在一定条件下可以形成互补。

命题 3：同时实行碳交易与政府补贴政策与无政府约束政策相比，有如下结论：

(1) 当 $c_2A_1 \geqslant B_3$ 时，

$$\begin{cases} S \leqslant \dfrac{2kLeD_1(c_2A_1 - B_3)}{B_3[c_2D_1 - D_2(\Delta - c_1 + Le)]} \text{时}, \\ p_1 > p_4, \varepsilon_1 < \varepsilon_4, \omega_1 > \omega_4 \\ S > \dfrac{2kLeD_1(c_2A_1 - B_3)}{B_3[c_2D_1 - D_2(\Delta - c_1 + Le)]} \text{时}, \\ p_1 > p_4, \varepsilon_1 < \varepsilon_4, \omega_1 < \omega_4 \end{cases}$$

(2) 当 $c_2A_1 < B_3$ 时，

$$\begin{cases} \dfrac{2k\beta c_2 Le(B_3 - c_2A_1)}{B_3(4k + B_4)} \leqslant S \leqslant \dfrac{2kLe(B_3 - c_2A_1)}{B_3B_2} \text{时}, \\ p_1 < p_4, \varepsilon_1 < \varepsilon_4; \omega_1 < \omega_4 \\ S > \dfrac{2kLe(B_3 - c_2A_1)}{B_3B_2}, S < \dfrac{2k\beta c_2 Le(B_3 - c_2A_1)}{B_3(4k + B_4)} \text{时}, \\ p_1 > p_4, \varepsilon_1 > \varepsilon_4, \omega_1 < \omega_4, S \text{无意义, 舍去} \end{cases}$$

证明：

$$\begin{cases} p_1 - p_4 = \dfrac{2k\beta Le(c_2A_1 - B_3)}{2\beta B_3 B_4} \\ \varepsilon_1 - \varepsilon_4 = \dfrac{\beta c_2 Le(B_3 - c_2A_1) - 2SB_3}{2B_3B_4} - \dfrac{S}{4k} \\ \omega_1 - \omega_4 = \\ \dfrac{2k\beta LeD_1(c_2A_1 - B_3) + \beta SB_3[(\Delta - c_1 + Le)D_2 - c_2D_1]}{4k\beta B_3B_4} \end{cases}$$

由 $0 \leqslant \varepsilon_1 \leqslant 1$，$0 \leqslant \varepsilon_4 \leqslant 1$，可得到 $B_3 > 0$，$B_4 > 0$，再由已知 $k > 0$，$\beta > 0$，$L > 0$，$e > 0$，$c_2 > 0$，$S > 0$，$(\Delta - c_1 + Le)D_2 - c_2D_1 < 0$，因此当 $c_2A_1 \geqslant B_3$ 时，$p_1 > p_4$，$\varepsilon_1 < \varepsilon_4$，$\omega_1$ 与 ω_4 的大小取决于 S 的大小，当 $S \leqslant \frac{2kLeD_1(c_2A_1 - B_3)}{B_3[c_2D_1 - D_2(\Delta - c_1 + Le)]}$ 时，$\omega_1 > \omega_4$，$S > \frac{2kLeD_1(c_2A_1 - B_3)}{B_3[c_2D_1 - D_2(\Delta - c_1 + Le)]}$ 时，$\omega_1 < \omega_4$；当 $c_2A_1 < B_3$ 时，$\omega_1 < \omega_4$，p_1 与 p_4，ε_1 与 ε_4 的大小取决于 S，当 $\frac{2k\beta c_2 Le(B_3 - c_2A_1)}{B_3(4k + B_4)} \leqslant S \leqslant \frac{2kLe(B_3 - c_2A_1)}{B_3B_2}$ 时，$p_1 < p_4$，$\varepsilon_1 < \varepsilon_4$，当 $S > \frac{2kLe(B_3 - c_2A_1)}{B_3B_2}$，$S < \frac{2k\beta c_2 Le(B_3 - c_2A_1)}{B_3(4k + B_4)}$ 时，$p_1 > p_4$，$\varepsilon_1 > \varepsilon_4$，此时 S 无意义舍去。

由命题 3 可知，与无政府约束政策相比，当 $c_2A_1 < B_3$ 时，同时实行碳交易与政府补贴政策会导致零售价与批发价均提高，需求量下降，不能使供应链达到较优状态；当 $c_2A_1 \geqslant B_3$ 时，同时实

行碳交易与政府补贴政策会导致同时批发价和零售价降低，需求量升高，回收率提高，可以使闭环供应链达到较优状态。

4 算例分析

通过算例来比较分析碳交易政策及政府补贴政策对再制造闭环供应链的影响。根据命题 3 可知，当$c_2A_1 > B_3$时，同时实行碳交易与政府补贴政策，供应链会达到较优状态，因此文中取数值时仅考虑$c_2A_1 > B_3$的情况。在参考相关文献[21]的基础上假设有关参数为：$c_m = 60$，$c_r = 30$，$\Delta = c_m - c_r = 30$，$\alpha = 300$，$\varepsilon_0 = 0.6$，$\beta = 3$，$c_1 = 25$，$c_0 = 15$，$c_2 = c_1 - c_0 = 10$，$e = 1$，$k = 400$，$E = 15$。由$0 \leqslant \varepsilon_2 \leqslant 1$知$L \leqslant 36$，当$L \in [0,18]$时为低交易价格，当$L \in [19,36]$时为高交易价格；由$0 \leqslant \varepsilon_3 \leqslant 1$知$S \leqslant 320$，当$S \in [0,160]$时，为低补贴力度，当$S \in [161,320]$时，为高补贴力度；由$0 \leqslant \varepsilon_4 \leqslant 1$知$2\,400L + 275S - 3LS \leqslant 88\,000$，回收率、碳排放量及两方利润随碳交易价格 ($L$) 和补贴力度 ($S$) 变化如图 1~图 12 所示。

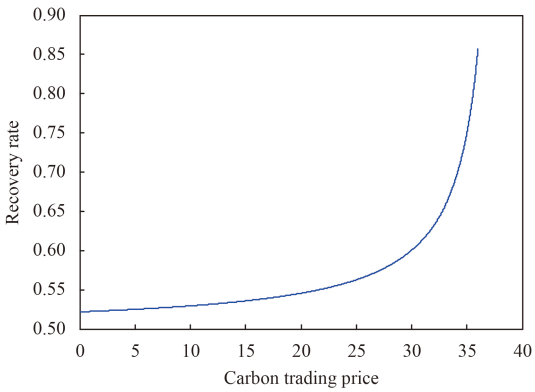

图 1 回收率随碳交易价格的变化趋势

Fig.1 Recovery rate varied with the price of carbon trading

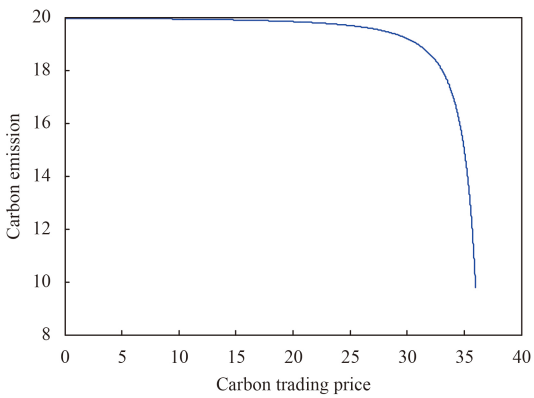

图 2 碳排放量随碳交易价格的变化趋势

Fig.2 Carbon emission varied with the price of carbon trading

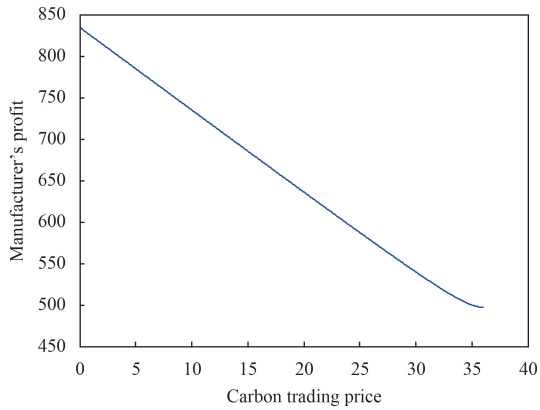

图 3 制造商利润随碳交易价格的变化趋势

Fig.3 Manufacturer's profits varied with the price of carbon trading

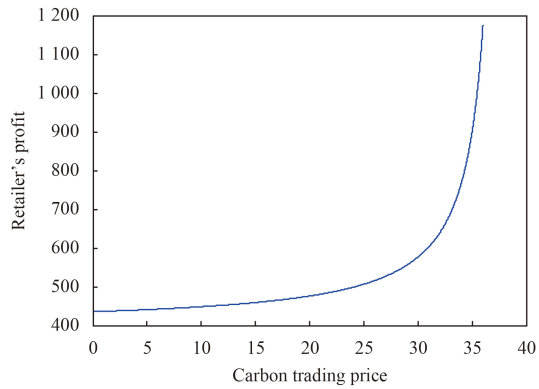

图 4 零售商利润随碳交易价格的变化趋势

Fig.4 Retailer's profits varied with the price of carbon trading

从图 1 可以看出，回收率随碳交易价格的增大而增大，当交易价格到最高临界值时，回收率达到最大。从图 2 可以看出，碳排放量首先随碳交易价格的不断增大而缓慢下降；当碳交易价格达到 25 时，碳排放量则随碳排放量的增大而急速下降。

从图 3、图 4 可以发现，制造商的利润在碳交易价格的取值范围内随碳交易价格的变大而不断减小，其原因是需要进行碳排放所致；而零售商的利润随碳交易价格的增大而增大。

综合图 1、2、3、4 可以发现，需要确定合适的碳交易价格，才能使再制造闭环供应链中的回收率、碳排放量及制造商和零售商利润等参数达到较好状态。

从图 5、图 6 可以看出，回收率随补贴力度的增大而增大，碳排放量随补贴力度的增大而下降，说明补贴政策可以有效地提高回收率与降低

碳排放量。

从图 7 可看出制造商的利润随补贴力度的增大而逐渐增大。从图 8 可以发现，零售商的利润则随补贴力度的增大先减小后上升趋势。

综合图 5、6、7、8 可以发现，政府应该制定合适的补贴力度使得再制造闭环供应链中的回收率、碳排放量及各方利润等参数达到较佳状态。

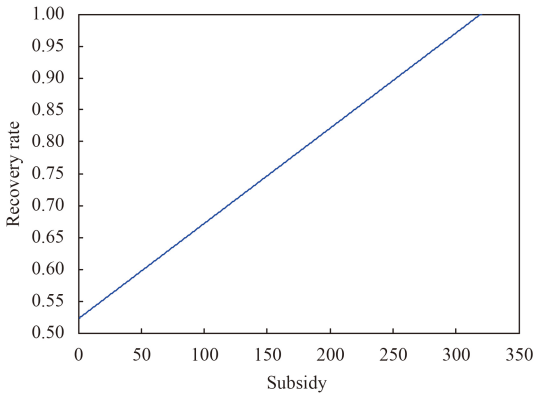

图 5　回收率随补贴力度的变化趋势

Fig.5　Recovery rate varied with the subsidy

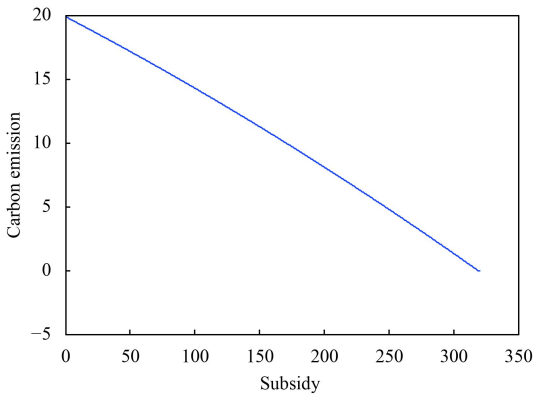

图 6　碳排放量随补贴力度的变化趋势

Fig.6　Carbon emission varied with the subsidy

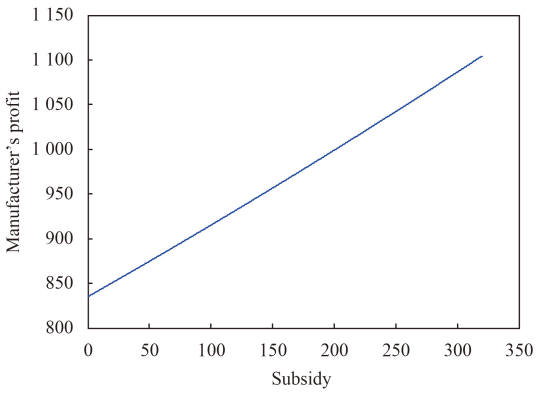

图 7　制造商利润随补贴力度的变化趋势

Fig.7　Manufacturer's profits varied with the subsidy

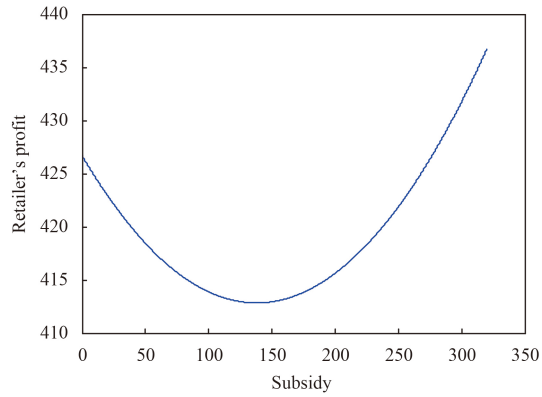

图 8　零售商的利润随补贴力度的变化趋势

Fig.8　Retailer's profits varied with the subsidy

图 9 反映了回收率随 S 与 L 的变化趋势，由图可以发现在确定 L、S 的取值时，使其处在网格图的顶部区域时，回收率能达到最优，此时 L、S 的取值范围较广，当 L 取高交易价格时，S 取低补贴力度时，回收率会达到较优状态；当 L 取低交易价格时，S 取高补贴力度时，回收率会达到较优状态。

图 10 反映了碳排放量随 S 与 L 的变化趋势，由图可以发现在确定 L、S 的取值时，使其处在网格图的最底部区域时，供应链的碳排放量较低，此时 L、S 的取值范围较广，当 L 取高交易价格时，S 取低补贴力度时，碳排放量较低；当 L 取低交易价格时，S 取高补贴力度时，碳排放量较低。

图 11 反映了制造商利润随 S 与 L 的变化趋势，由图可以发现在确定 L、S 的取值时，使其处在网格图的最顶部区域时，制造商的利润达到较优状态，此时 L 的取值范围在前半区间，S 的取

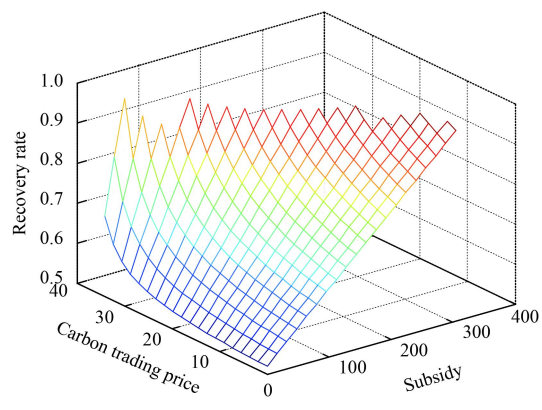

图 9　回收率随补贴与碳交易价格的变化趋势

Fig.9　Recovery rate varied with the subsidy and the price of carbon trading

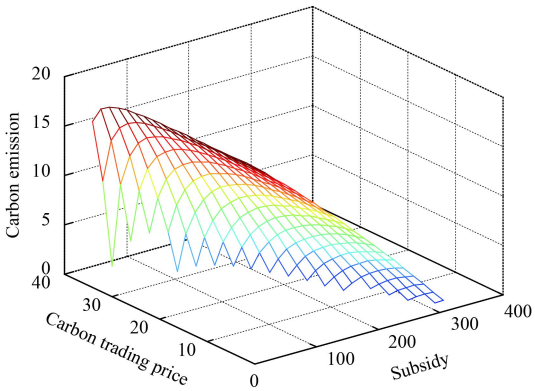

图 10 碳排放量随补贴与碳交易价格的变化趋势

Fig.10 Carbon emission varied with the subsidy and the price of carbon trading

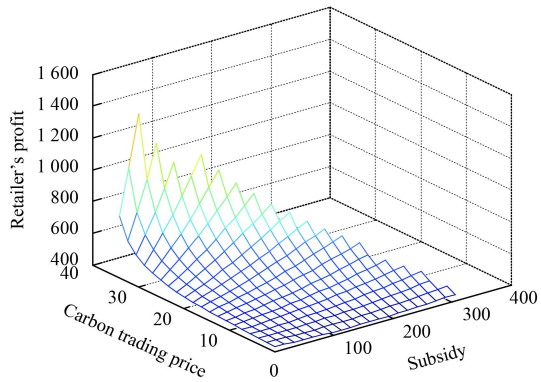

图 12 零售商利润随补贴与碳交易价格的变化趋势

Fig.12 Retailer's profits varied with the subsidy and the price of carbon trading

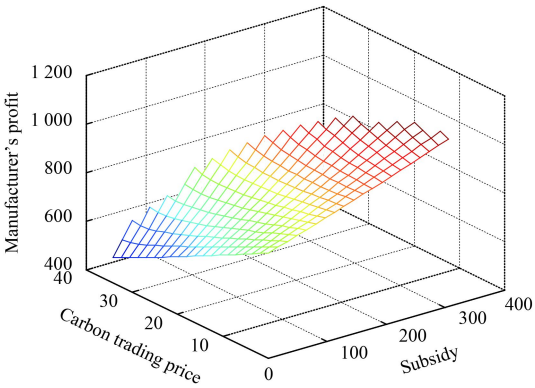

图 11 制造商利润随补贴与碳交易价格的变化趋势

Fig.11 Manufacturer's profits varied with the subsidy and the price of carbon trading

值范围都在后半区间，即：L 取低交易价格，S 取高补贴力度。

图 12 反映了零售商利润随 S 与 L 的变化趋势，由图可以发现在确定 L、S 的取值时，使其处在网格图的最顶部区域时，制造商的利润达到较优状态，在较优状态时 L 的取值在后半区间，S 的取值在前半区间，即：L 取高交易价格，S 取低补贴力度。

通过上面的分析，当取 L=18 时，此时适宜把补贴定为 S=200，既满足 $0 \leqslant \varepsilon_2$、$\varepsilon_3$、$\varepsilon_4 \leqslant 1$，又能使供应链利润和碳排放量达到较优状态。计算结果如表 2。

从表 2 可以发现，碳交易政策会导致零售价与批发价均降低，回收率与需求量均上升，但不能有效的降低碳排放量；政府补贴政策会使得零售价和碳排放量降低，回收率和需求量提高，补贴政策虽然可以有效的降低碳排放量，但会导致批发价升高及零售商的利润降低；而在碳交易与补贴政策下，零售价降低、回收率提高、需求量增加、供应链总利润大幅提高，同时碳排放量也有大幅度的下降，因此同时实行碳交易与政府补贴政策可以弥补单独实行两种政策的不足，有效的降低碳排放量、提高供应链的整体利润，使得供应链达到较优状态。

表 2 4 种政策的决策结果

Table 2 Decision results of four policies

Parameters	No government restraint policy	Carbon trading policy	Government subsidy policy	Government subsidy and carbon trading policy
ω	79.13	78.36	79.40	71.86
p	86.09	85.57	84.78	80.16
ε	0.52	0.54	0.82	0.99
D (p)	41.73	43.29	45.66	59.52
π_M	834.78	746.07	998.64	1 170.06
π_R	435.54	468.26	426.35	897.04
π_M+π_R	1 270.32	1 214.33	1 424.99	2 067.10
V_e	20.03	19.91	8.22	0.6

5 结　论

采用 Stackelberg 博弈，研究了在零售商负责回收的情况下，政府补贴和碳交易政策对再制造闭环供应链的影响，并采用数值算例进行了验证，结果表明：

(1) 在碳交易政策下，会导致零售价与批发价均降低，回收率与需求量均上升，但并不能有效的降低碳排放量。

(2) 在补贴政策下，会使得零售价和碳排放量降低，回收率和需求量提高，补贴政策可以有效的降低碳排放量，但会导致批发价升高及零售商的利润降低。

(3) 在碳交易与补贴政策下，可以使得零售价降低、回收率提高、需求量增加、供应链总利润大幅提高，同时碳排放量也有较大幅度的下降，因此同时实行碳交易与政府补贴政策可以弥补单独实行两种政策的不足，有效的降低碳排放量、提高供应链的整体利润，使得供应链达到较优状态。

文中研究是假设再制造品与新产品是同质的，未来可以考虑研究再制造品与新品的价格不同的情况。另外，文中假设需求是一定的，在以后的研究中可以考虑将随机需求引入到再制造闭环供应链中。

参考文献

[1] HOEN K M R, TAN T, FRANSOO J C, et al. Effect of carbon emission regulations on transport mode selection in supply chains[R]. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2010: 1-32.

[2] SONG J, LENGM. Analysis of the single- period problem under carbon emissions policies[M]. New York: Springer, 2012: 297-313.

[3] CHEN X, BENJAAFAR S, ELOMRI A. The carbon-constrained EOQ[J]. Operations Research Letters, 2013, 41(2): 172-179.

[4] TOPTAL A, ÖZLU H, KONUR D. Joint decisions on inventory replenishment and emission reduction investment under different emission regulations[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(1): 243-269.

[5] DRAKE D, KLEINDORFER P R, LUK B, et al. Technology choice and capacity investment under emissions regulation[J]. Social Science Electronic Publishing, 2010, 10(93): 1-41.

[6] 常香云, 朱慧赟. 碳排放约束下企业制造/再制造生产决策研究[J]. 科技进步与对策, 2012, 29(11): 75-78.
CHANG X Y, ZHU H Y. Enterprise manufacturing/remanufacturing production decision research under the constraint of carbon emission[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2012, 29(11): 75-78 (in Chinese).

[7] 赵道致, 原白云, 夏良杰, 等. 碳排放约束下考虑制造商竞争的供应链动态博弈[J]. 工业工程与管理, 2014, 19(1): 65-71.
ZHAO D Z, YUAN B Y, XIA L J, et al. Dynamic game study in supply chain with manufacturers' competition under constraint of productions' emission[J]. Industrial Engineering and Management, 2014, 19(1): 65-71 (in Chinese).

[8] 马秋卓, 宋海清, 陈功玉, 等. 碳配额交易体系下企业低碳产品定价及最优碳排放策略[J]. 管理工程学报, 2014, 28(2): 127-136.
MA Q Z, SONG H Q, CHENG G Y, et al. Low carbon product pricing and optimal carbon emission strategy under cap-and-trade[J]. Journal of Industrial Engineering/Engineering Management, 2014, 28(2): 127-136 (in Chinese).

[9] 岳晓娟. 考虑碳排放的零售商定价策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
YUE X J. Research on pricing strategy of retailer considering carbon emissions[D]. Chengdu: Southeast Jiao Tong University, 2013 (in Chinese).

[10] HUA G W, CHENG T C E, WANG S Y. Managing carbon footprints in inventory management[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 132(2): 178-185.

[11] ZHAO J, HOBBS B F, PANG J S. Long-run equilibrium modeling of emissions allowance allocation systems in electric power markets[J]. Operations Research, 2007, 58(3): 529-548.

[12] DONG C, SHEN B, CHOW P S, et al. Sustainability investment under cap-and-trade regulation[J]. Annals of Operations Research, 2014, 240(2): 509-531.

[13] 杨春苗, 戴更新. 零售商回收模式下政府补贴对闭环供应链定价策略的影响[J]. 物流科技, 2016, 39(4): 116-120.
YANG C M, DAI G X. The effect of government subsidies on the pricing strategies of closed-loop supply chain with retailer-collection channel[J]. Logistics Sci-Tech, 2016, 39(4): 116-120 (in Chinese).

[14] 郭成恒, 丁雪峰. 考虑碳排放差异的闭环供应链奖惩机制与减排策略[J]. 统计与决策, 2014(13): 54-57.
GUO C H, DING X F. Reward and punishment mechanism and emission reduction strategy of closed-loop supply chain considering the difference of carbon emission[J]. Statistics & Decision, 2014(13): 54-57 (in Chinese).

[15] 徐春秋, 赵道致, 原白云. 政府补贴政策下产品差别定价与

供应链协调机制[J]. 系统工程, 2014, 32(3): 78-86.
XU C Q, ZHAO D Z, YUAN B Y. Product differential pricing and supply chain coordination mechanism under governmental subsidy policy[J]. Systems Engineering, 2014, 32(3): 78-86 (in Chinese).

[16] 刘渤海, 史佩京, 徐滨士, 等. 机电产品的再制造补贴政策[J]. 中国表面工程, 2012, 25(4): 15-20.
LIU B H, SHI P J, XU B S, et al. Subsidy policy of remanufacturing for electromechanical products[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(4): 15-20 (in Chinese).

[17] 周占峰. 政府补贴下再制造逆向供应链产品回收定价策略研究[J]. 物流技术, 2012, 31(19): 122-123.
ZHOU Z F. Study on pricing strategy of price recycling in re-manufacturing reverse supply chains with government subsidy[J]. Logistics Technology, 2012, 31(19): 122-123 (in Chinese).

[18] 朱庆华, 窦一杰. 基于政府补贴分析的绿色供应链管理博弈模型[J]. 管理科学学报, 2011, 14(6): 86-95.
ZHU Q H, DOU Y J. Green supply chain management game model based on government subsidy analysis[J]. Journal of Management Sciences in China, 2011, 14(6): 86-95 (in Chinese).

[19] WEBSTER S, MITRA S. Competitive strategy in remanufacturing and the impact of take-back laws[J]. Journal of Operations Management, 2007, 25(6): 1123-1140.

[20] SAVASKAN R C, WASSENHOVE L N V. Reverse channel design: The case of competing retailers[J]. Management Science, 2006, 52(1): 1-14.

[21] 聂佳佳, 王拓, 赵映雪, 等. 碳排放约束下再制造闭环供应链回收策略[J]. 管理工程学报, 2015, 29(3): 249-256.
NIE J J, WANG T, ZHAO Y X, et al. Remanufacturing closed loop supply chain recycling strategy constrained by carbon emissions[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2015, 29(3): 249-256 (in Chinese).

(责任编辑: 王文宇)

• 本刊讯 •

2018 国际薄膜大会 (ThinFilms2018) 将在深圳召开

2018 国际薄膜大会将于 2018 年 7 月 17~20 日在深圳宝安区沙井维纳斯皇家酒店召开。国际薄膜大会始于 2002 年，每两年一届。与历届会议一样，2018 国际薄膜大会 (ThinFilms2018) 将再次汇集、展示和交流与薄膜和表面涂层加工、表征和应用有关的最新进展和最前沿技术。本届会议主席为国际薄膜学会会长、新加坡南洋理工大学张善勇 (Sam Zhang) 教授，中国区域主席为深圳真空技术行业协会会长陈寿。

会议主题包括：生物医学涂层；表面防护涂层；工业应用涂层；能量转换和存储 I（太阳能电池，锂离子电池，超级电容器等）；能量转换和存储 II（燃料电池，电解槽，氢能，气体分离，电化学和光催化等）；无机薄膜和纳米颗粒；纳米结构和纳米复合材料；光学薄膜；有机电子与光子学以及智能薄膜和涂层等。会议论文经同行评议接收后，将在材料与薄膜类国际一级期刊 Surface & Coatings Technology（SCT，材料科学，SCI 涂料和薄膜领域一区 (Q1) 期刊）上发表。自国际薄膜大会举办以来，投稿论文呈逐年上升趋势，第一届参会文章 70 篇，2006 年增加至 500 篇，从第 4 届开始每届文章均超过 800 多篇。

本届会议的论文摘要截稿时间为 2018 年 3 月 15 日；报告接收通知时间为 2018 年 3 月 31 日；优惠注册截止时间为 2018 年 5 月 31 日；论文全文截稿时间为 2018 年 8 月 31 日。其他详细信息可以登录官方网站： http://www.thinfilms.sg/conferences/thinfilms2018 进行查询。

(本刊编辑部 供稿)