

考虑低碳信贷融资的制造/再制造生产决策研究

陈伟达 董凯丽

(东南大学经济管理学院, 南京 211189)

【摘要】 低碳信贷是银行在政府政策的驱动下, 为鼓励企业进行节能减排活动而向企业提供的金融服务。本文考虑中小型再制造企业的有限自有资金, 在碳限额与交易环境下, 分别构建不考虑减排和申请低碳信贷融资进行减排投资情形下的制造/再制造生产决策模型, 并利用 Kuhn-Tucker 条件对模型进行求解。通过数值仿真, 分析了自有资金、减排投资额和碳排放阈值对制造/再制造生产决策的影响。研究表明: 严格的碳排放政策可能会滞缓再制造行业的发展并限制企业的产出, 相反, 相对宽松的碳排放政策更能促进再制造行业的发展; 对于存在生产资金约束的企业, 政府可以设置相对宽松的碳排放政策和合理的碳排放阈值, 刺激企业进行减排技术的投入, 并推动低碳信贷的发展。

【关键词】 低碳信贷 碳限额与交易 制造/再制造 减排投资 生产决策 碳排放阈值

DOI: 10.3969/j.issn.1004-910X.2021.08.013

【中图分类号】 F272.3; F830.5 **【文献标识码】** A

引言

气候变化已经成为近年来人类面临的主要挑战之一。自工业革命以来, 由于人口数量的不断增长以及人类过度使用化石燃料, 大气中二氧化碳含量大幅度增加, 引起了全球气候变暖。2019年12月欧盟委员会发布《欧洲绿色新政》, 并提出2050年实现欧洲大陆的碳中和。同时, 作为世界上最大的能源消费国和碳排放国, 中国也于2020年9月提出争取在2060年前实现国内碳中和。为了实现此目标, 我国政府积极采取相应措施, 如碳税、碳限额、碳限额与交易、碳补贴等交易型碳金融政策的实施, 还鼓励企业在生产过程中进行减排投资。

在此背景下, 作为一种能有效节约生产成本并减少环境损害的新型低碳生产模式^[1], 再制造受到了广泛的关注, 如施乐、佳能等公司均开展了复印机再制造业务^[2], Espri 等也授权开展了服装行业的再制造业务^[3]。但在现实中再制造企业的发展, 特别是中小型企业总是会受到资金约束, 影响企业的正常运营^[4]。同时, 在减排政策的环境压力下, 投资绿色技术加剧了企业的资金

约束。为缓解企业的财务困境, 鼓励企业进行减排技术的投资, 多家银行开展了绿色贷款的融资业务, 如低碳信贷是银行在政府政策的驱动下, 为鼓励企业进行节能减排活动而向企业提供的金融服务。在实践中, 作为最早践行赤道原则的商业银行, 兴业银行不断创新低碳信贷产品, 如碳排放权金融和“8+1”融资服务, 同时, 以优惠贷款为核心, 为节能环保企业提供多样化的融资模式。如在提交了减少温室气体排放证明报告后, 通过申请低碳信贷, 深圳相控公司从兴业银行获得了750万元人民币的贷款; 此外, 华融湘江银行和浦发银行的绿色贷款的申请政策也均要求公司必须符合环保标准^[5]。因此, 公司申请低碳信贷, 必须满足碳排放的严格约束。

基于此, 考虑再制造企业申请低碳信贷进行减排技术投资具有一定的现实意义。与本文相关的文献主要分为3类: (1) 考虑碳排放的再制造生产运作相关; (2) 考虑资金约束和融资的生产运作相关; (3) 低碳信贷融资相关。

目前, 在考虑碳排放的再制造生产运作研究方面已有较多文献。Dou 等^[6]研究在制造商进行

收稿日期: 2021-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“碳金融下工程机械再制造企业生产与碳减排决策集成优化研究”(项目编号: 71971058); 国家自然科学基金资助项目“低碳环境下集成财务运作的制造/再制造生产决策优化研究”(项目编号: 71571042); 江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目“碳信贷下工程机械再制造企业生产决策优化研究”(项目编号: SJCX20_0040); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(项目编号: 3214002105D)。

作者简介: 陈伟达, 东南大学经济管理学院教授, 博士生导师。研究方向: 再制造运作管理和低碳运作管理。董凯丽, 东南大学经济管理学院硕士研究生。研究方向: 再制造运作管理。

两阶段生产时的税收价格分别变化对总碳排放量的影响,提出可以根据制造商的生产决策和再制造的特点有选择地提高税收;张焕勇等^[7]考虑企业同时生产新品、再制品和翻新品的生产决策模型,得出在不同碳排放节约和碳交易价格下的生产组合;Hu等^[8]比较了碳税与限额交易政策对再制造生产的影响,研究表明,在控制碳排放时,碳限额和交易更有利于再制造,只有当配额水平太高时,引入碳税才对再制造企业更有利;Chai等^[9]研究了一个垄断制造商在普通市场和绿色市场同时进行制造和再制造时制造商的最优决策,结果表明,在普通市场和绿色市场中,碳限额和交易对再制造都是有价值的;Zhao等^[10]研究了政府补贴和消费者环境意识对再制造生产企业产品价格决策和产量决策的影响。但上述文献均忽略了企业资金对再制造生产决策的影响。

同时,将资金约束纳入到再制造运作研究中已受到部分学者的关注。王永健和陈伟达^[11]认为资源和资金都是企业的重要经营资源,自有资金的限制使企业难以实现最优生产量;Wu等^[12]研究了银行信贷和贸易信贷融资对资金受约束的绿色供应链的生产问题;Yang等^[13]研究贸易信贷和收入共享合同对绿色供应链绩效的影响;李超和骆建文^[14]研究了由资金约束的供应商和资金充足的零售商组成的二级供应链,分析零售商预付款对供应商生产和供应链运作效率的影响;张克勇等^[15]比较银行贷款、股权融资和组合融资对减排资金短缺的制造商的利润和社会效益的影响;尤天慧等^[16]研究由制造商、零售商和受资金约束的回收商组成的闭环供应链,分析回收商进行内部融资和外部融资,考虑闭环供应链的融资模式选择问题。但以上文献较少涉及碳减排投资活动。同时,上述文献所涉及的融资方式对贷款条件有一定的要求,一些中小企业往往由于缺乏信用条件和抵押物不足而难以获得融资进行碳减排技术投资,实现产品的低碳转型。基于此,采用低碳信贷融资可以进一步满足中小企业的贷款需求。

在低碳信贷融资方面,高歌^[17]认为低碳信贷是基于低碳理念,将绿色信贷专业化为两方面的信贷体系:(1)给予低碳企业或者拥有节能减排项目的企业优惠贷款利率;(2)对CDM项目下的CERs进行贷款;杜莉和韩丽娜^[18]提出低碳信贷理念的建立,是现代商业银行建立碳金融的关键,并提出了企业申请低碳信贷需完成社会及环境评估;李虹^[19]基于滨海新区的低碳信贷实例,

对其影响因素进行定量测算,得到低碳信贷得以有效推行的关键因素;丁志刚等^[20]考虑绿色信贷与供应链成员成本分担对收益和减排水平的影响,研究表明绿色信贷有利于供应链成员加强低碳技术的采纳。但上述文献集中于对开展低碳信贷的必要性以及其在供应链中的分析,缺少对低碳信贷应用于再制造企业中的研究。

基于此,本文在现有研究的基础上,以再制造企业为研究对象,在碳限额与交易政策下,分别分析再制造企业不考虑减排和考虑低碳信贷进行碳减排投资对企业生产决策的影响,从而探讨减排投资额和碳排放阈值对再制造生产决策的影响,为再制造企业申请低碳信贷提供一定的理论支持。

1 问题描述与模型构建

1.1 问题描述

考虑一个中小规模的制造/再制造企业生产两种产品:新品和再制品。两种产品目标市场相同,且相互竞争、相互替代。政府根据总体减排目标,向再制造企业分配免费的碳排放配额,再制造企业根据生产中的碳排放情况可以在碳交易市场中进行碳配额的交易。企业由于规模限制,期初资金仅够用于生产运营,在低碳经济和低碳信贷政策的驱动下,企业期初可以向银行申请低碳信贷进行碳减排投资以减少企业生产过程中的碳排放。银行对开展节能减排项目的企业进行环境评估,充分考虑贷款项目的碳排放总量,对于符合要求的企业提供全额的贷款支持和优惠的贷款利率,但贷款仅限于碳减排投资。

1.2 模型假设和参数设置

在建模前,为方便研究,本文建立如下假设,相关变量和参数见表1。

(1) 假设再制造企业的初始自有资金为 B ($B \geq 0$),且自有资金有限,生产无法达到最优水平。

(2) 新品相对于再制造产品在生产过程中产生更多的碳排放,即 $e_n > e_r$;新品的生产成本高于再制造产品,即 $c_n > c_r$ 。

(3) 消费者对新品和再制造产品的认知存在差异,根据Chang等^[21]的研究,可以得到新品和再制造产品的逆需求函数分别为: $p_n = Q - q_n - \varphi q_r$, $p_r = \varphi(Q - q_n - q_r)$ 。

(4) 为了简化表示,根据陈玉玉等^[22]的研究,定义 $\eta_1 = Q - c_n - e_n p_e$, $\eta_2 = \varphi Q - c_r - e_r p_e$,且有 $\eta_1 > \eta_2 > \varphi \eta_1 > 0$ 。

表1 参数符号及含义

符号	含义
决策变量 q_n, q_r	新品和再制造品的产量
Q	潜在市场需求量
φ	消费者对再制造产品的偏好
p_n, p_r	单位新品/再制造产品的销售价格
c_n, c_r	单位新品/再制造产品的生产成本
e_n, e_r	单位新品/再制造产品的碳排放量
p_e	碳交易价格
相关参数 L	政府分配的免费碳配额
B	再制造企业的自有资金
B_1	再制造企业申请的低碳信贷融资, 即减排投资额
T	银行或政府要求的碳排放上限
r	低碳信贷优惠贷款利率
θ	单位碳减排投资的减排转化率

1.3 模型构建

1.3.1 不考虑碳减排

为研究企业申请低碳信贷进行减排对生产决策的影响, 首先分析企业不考虑减排时的情形。在此种情形下, 企业不考虑碳减排, 仅进行生产。在碳限额和交易的环境下, 基于企业利润最大化, 得到企业的利润最大化模型为:

$$\max_{p_n, p_r} \pi_1 = (p_n - c_n)q_n + (p_r - c_r)q_r - p_e(e_n q_n + e_r q_r - L) \quad (1)$$

$$s.t. \quad c_n q_n + c_r q_r \leq B$$

式(1)中目标函数第1、2项为新品和再制造品的销售收入减去生产成本, 第3项为期末碳交易的收入。当企业期末碳排放总量高于政府分配的配额时, 需要从碳交易市场购入超出的碳配额, 则需支付成本 $p_e(e_n q_n + e_r q_r - L)$; 当企业期末碳排放总量低于政府分配的配额时, 可以在碳交易市场出售多余的碳配额, 获得的收益为 $p_e(L - e_n q_n - e_r q_r)$ 。约束条件表示生产新品和再制造品的成本不超过自有资金。

该问题存在生产资金约束, 是一个非线性规划问题, 本文采用 Lagrange 定理和 Kuhn-Tucker 条件对其进行求解。利用 K-T 条件对解的特征进行分析, 可以得到如下命题:

命题1: 当 $B > B_0 = \frac{c_n(\eta_1 - \eta_2)}{2(1-\varphi)} + \frac{c_r(\eta_2 - \varphi\eta_1)}{2\varphi(1-\varphi)}$ 时, 企业生产不受自有资金约束, 得到的最优解为:

$$\begin{cases} q_{1n} = \frac{\eta_1 - \eta_2}{2(1-\varphi)} \\ q_{1r} = \frac{\eta_2 - \varphi\eta_1}{2\varphi(1-\varphi)} \end{cases}$$

此时, 可以得到为实现最优的生产决策所需

的最小初始资金为 $B_0 = c_n q_{1n} + c_r q_{1r} = \frac{c_n(\eta_1 - \eta_2)}{2(1-\varphi)} + \frac{c_r(\eta_2 - \varphi\eta_1)}{2\varphi(1-\varphi)}$ 。

证明: 对式(1)分别求 π 对 q_n, q_r 的二阶导数, 得到利润 π_1 的海瑟矩阵为: $\begin{bmatrix} -2 & -2\varphi \\ -2\varphi & -2\varphi \end{bmatrix}$, 易知该矩阵负定, 故 π_1 是关于 (q_n, q_r) 的凹函数, 存在唯一的 q_{1n}^*, q_{1r}^* 使得利润最大。构造的 Lagrange 函数和 K-T 条件为:

$$L_1 = \eta_1 q_n + \eta_2 q_r - q_n^2 - \varphi q_r^2 - 2\varphi q_n q_r + L p_e \quad (2)$$

$$s.t. \begin{cases} \eta_1 - 2q_n - 2\varphi q_r - \lambda_1 c_n = 0 \\ \eta_2 - 2\varphi q_n - 2q_r - \lambda_1 c_r = 0 \\ \lambda_1 (B - c_n q_n - c_r q_r) = 0 \end{cases}$$

其中, $\lambda_1 \geq 0$ 是 Lagrange 乘子。当 $\lambda_1 = 0$ 时,

对式(2)方程组求解, 得到 $q_{1n} = \frac{\eta_1 - \eta_2}{2(1-\varphi)}, q_{1r} = \frac{\eta_2 - \varphi\eta_1}{2\varphi(1-\varphi)}$ 。证毕。

命题2: 当 $c_n q_n + c_r q_r = B (B_1 \leq B \leq B_0)$ 时, 存在 q_{1n}, q_{1r} 同时大于0, 为问题的最优解, 此时有:

$$\begin{cases} q_{1n} = \frac{\eta_1 c_r^2 + 2\varphi B(c_n - c_r) - \eta_2 c_n c_r}{2(\varphi c_n^2 - 2\varphi c_n c_r + c_r^2)} \\ q_{1r} = \frac{\eta_2 c_n^2 - 2B(\varphi c_n - c_r) - \eta_1 c_n c_r}{2(\varphi c_n^2 - 2\varphi c_n c_r + c_r^2)} \end{cases}$$

证明: 当 $\lambda_1 > 0$ 时, 此时 $c_n q_n + c_r q_r = B$, 联立式(2)的方程组, 解得 $q_{1n} = \frac{\eta_1 c_r^2 + 2\varphi B(c_n - c_r) - \eta_2 c_n c_r}{2(\varphi c_n^2 - 2\varphi c_n c_r + c_r^2)}$,

$q_{1r} = \frac{\eta_2 c_n^2 - 2B(\varphi c_n - c_r) - \eta_1 c_n c_r}{2(\varphi c_n^2 - 2\varphi c_n c_r + c_r^2)}$ 。为保证 q_{1n}, q_{1r} 同

时大于0, 可得 $B \geq B_1 = \frac{\eta_2 c_n c_r - \eta_1 c_r^2}{2\varphi(c_n - c_r)}$, 故此时自有资金的取值为 $B_1 \leq B \leq B_0$ 。证毕。

命题3: 当 $B < B_1 = \frac{\eta_2 c_n c_r - \eta_1 c_r^2}{2\varphi(c_n - c_r)}$ 时, 该问题的

最优解为 $q_{1n} = 0, q_{1r} = \frac{B}{c_r}$ 。

证明: 易知当 $B < \frac{\eta_2 c_n c_r - \eta_1 c_r^2}{2\varphi(c_n - c_r)}$ 时, $q_{1n} < 0$, 与实

际产量非负矛盾, 故此时 $q_{1n}=0$, 根据 $c_n q_n + c_r q_r = B$, 得到 $q_r = \frac{B}{c_r}$ 。证毕。

1.3.2 申请低碳信贷进行碳减排

在此种情形下, 企业考虑碳减排, 选择向银行申请低碳信贷融资进行减排投资。在向银行贷款时, 银行根据企业的低碳减排活动, 评估企业采纳低碳技术后的碳排放量, 只有当企业的总碳排放量小于银行规定的阈值时, 银行才提供低碳信贷支持企业的减排技术投资, 给予企业优惠的贷款利率。企业期末需支付碳减排技术投资的本息和。企业的利润最大化模型为:

$$\begin{aligned} \max_{p_n, p_r} \pi_2 &= (p_n - c_n)q_n + (p_r - c_r)q_r - p_e [(e_n - \theta B_t)q_n + (e_r - \theta B_t)q_r - L] - B_t(1+r) \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} c_n q_n + c_r q_r \leq B \\ (e_n - \theta B_t)q_n + (e_r - \theta B_t)q_r \leq T \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{其中 } T_1 = \frac{(e_n - \theta B_t)[\eta_1 c_r^2 + (2\varphi B - \theta p_e B_t c_r)(c_n - c_r) - \eta_2 c_n c_r] + (e_r - \theta B_t)[\eta_2 c_n^2 - 2B(\varphi c_n - c_r) - \eta_1 c_n c_r + \theta p_e B_t c_n (c_n - c_r)]}{2(\varphi c_n^2 - 2\varphi c_n c_r + c_r^2)}$$

证明: 同命题1证明方法, 可得到 π_2 是关于 (q_n, q_r) 的凹函数, 对式(3)构造的 Lagrange 函数和 K-T 条件为:

$$\begin{aligned} L_2 &= \eta_1 q_n + \eta_2 q_r - q_n^2 - \varphi q_r^2 - 2\varphi q_n q_r + \theta p_e B_t (q_n + q_r) + L p_e - B_t(1+r) \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} \eta_1 - 2q_n - 2\varphi q_r + \theta p_e B_t - \lambda_2 c_n - \lambda_3 (e_n - \theta B_t) = 0 \\ \eta_2 - 2\varphi q_n - 2q_r + \theta p_e B_t - \lambda_2 c_r - \lambda_3 (e_r - \theta B_t) = 0 \\ \lambda_2 (B - c_n q_n - c_r q_r) = 0 \\ \lambda_3 [T - (e_n - \theta B_t)q_n - (e_r - \theta B_t)q_r] = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{此时, } T_1 = \frac{(e_n - \theta B_t)[\eta_1 c_r^2 + (2\varphi B - \theta p_e B_t c_r)(c_n - c_r) - \eta_2 c_n c_r] + (e_r - \theta B_t)[\eta_2 c_n^2 - 2B(\varphi c_n - c_r) - \eta_1 c_n c_r + \theta p_e B_t c_n (c_n - c_r)]}{2(\varphi c_n^2 - 2\varphi c_n c_r + c_r^2)}$$

当 $\lambda_2 > 0, \lambda_3 > 0$ 时, 存在 $T < T_1$, 此时 $T - (e_n - \theta B_t)q_n - (e_r - \theta B_t)q_r = 0$, 联立式(4)中的方程组, 考虑同时生产新品和再制造产品, 得到低碳排放下的最优解为:

$$\begin{cases} q_{2n}^L = \frac{Tc_r - B(e_r - \theta B_t)}{c_r(e_n - \theta B_t) - c_n(e_r - \theta B_t)} \\ q_{2r}^L = \frac{B(e_n - \theta B_t) - Tc_n}{c_r(e_n - \theta B_t) - c_n(e_r - \theta B_t)} \end{cases} \quad \text{。证毕。}$$

$$\begin{cases} q_{2n}^L = \frac{\eta_1(e_r - \theta B_t)^2 + 2\varphi T(e_n - e_r) - \eta_2(e_n - \theta B_t)(e_r - \theta B_t) - \theta p_e B_t(e_r - \theta B_t)(e_n - e_r)}{2[(e_r - \theta B_t)^2 + \varphi \theta B_t(e_r - \theta B_t) - \varphi e_r(e_n - \theta B_t) + \varphi e_n(e_n - e_r)]} \\ q_{2r}^L = \frac{\eta_2(e_n - \theta B_t)^2 - 2T[(e_n - \theta B_t) - (e_r - \theta B_t)] - \eta_1(e_n - \theta B_t)(e_r - \theta B_t) + \theta p_e B_t(e_n - \theta B_t)(e_n - e_r)}{2[(e_r - \theta B_t)^2 + \varphi \theta B_t(e_r - \theta B_t) - \varphi e_r(e_n - \theta B_t) + \varphi e_n(e_n - e_r)]} \end{cases}, T < T_2$$

根据 An 等^[5]的研究, 式(3)中 θB_t 是指由于减排投资而导致的单位产品碳排放的减少量, $(e_n - \theta B_t)q_n + (e_r - \theta B_t)q_r \leq T$ 表示再制造企业的碳排放受银行或政府的约束。

命题4: 当企业自有资金不足, 存在 $T \geq T_1$ 时, 得到高碳排放条件下的最优解(用上标 H 表示), 当 $T < T_1$ 时, 得到低碳排放条件下的最优解(用上标 L 表示):

$$\begin{cases} q_{2n}^H = \frac{\eta_1 c_r^2 + (2\varphi B - \theta p_e B_t c_r)(c_n - c_r) - \eta_2 c_n c_r}{2(\varphi c_n^2 - 2\varphi c_n c_r + c_r^2)} \\ q_{2r}^H = \frac{\eta_2 c_n^2 - 2B(\varphi c_n - c_r) - \eta_1 c_n c_r + \theta p_e B_t c_n (c_n - c_r)}{2(\varphi c_n^2 - 2\varphi c_n c_r + c_r^2)} \end{cases}, T \geq T_1$$

$$\begin{cases} q_{2n}^L = \frac{Tc_r - B(e_r - \theta B_t)}{c_r(e_n - \theta B_t) - c_n(e_r - \theta B_t)} \\ q_{2r}^L = \frac{B(e_n - \theta B_t) - Tc_n}{c_r(e_n - \theta B_t) - c_n(e_r - \theta B_t)} \end{cases}, T < T_1$$

当 $\lambda_2 > 0, \lambda_3 = 0$ 时, 存在 $T \geq T_1 = (e_n - \theta B_t)q_n^H + (e_r - \theta B_t)q_r^H$, 此时 $c_n q_n + c_r q_r = B$, 联立式(4)中的方程组, 考虑同时生产新品和再制造产品, 得到高碳排放下的最优解为:

$$\begin{cases} q_{2n}^H = \frac{\eta_1 c_r^2 + (2\varphi B - \theta p_e B_t c_r)(c_n - c_r) - \eta_2 c_n c_r}{2(\varphi c_n^2 - 2\varphi c_n c_r + c_r^2)} \\ q_{2r}^H = \frac{\eta_2 c_n^2 - 2B(\varphi c_n - c_r) - \eta_1 c_n c_r + \theta p_e B_t c_n (c_n - c_r)}{2(\varphi c_n^2 - 2\varphi c_n c_r + c_r^2)} \end{cases}$$

命题5: 当企业自有资金充足时, 存在 $T \geq T_2$ 时, 得到高碳排放条件下的最优解, 当 $T < T_2$ 时, 得到低碳排放条件下的最优解:

$$\begin{cases} q_{2n}^H = \frac{\eta_1 - \eta_2}{2(1 - \varphi)} \\ q_{2r}^H = \frac{\eta_2 - \varphi \eta_1 + (1 - \varphi)\theta p_e B_t}{2\varphi(1 - \varphi)} \end{cases}, T \geq T_2$$

$$\text{其中 } T_2 = \frac{(e_n - \theta B_t)(\eta_1 - \eta_2)}{2(1-\varphi)} + \frac{(e_r - \theta B_t)[\eta_2 - \varphi\eta_1 + (1-\varphi)\theta p_e B_t]}{2\varphi(1-\varphi)}。$$

证明过程同命题4。

命题4和命题5表明最优产量与自有资金和银行规定的碳排放阈值有关。当 $T \geq T_1$ 或 $T \geq T_2$ 时, 碳排放政策相对宽松, 即高碳排放条件时, 再制造企业的新品产量和再制品产量仅取决于生产中的相关参数, 再制造企业可以根据自有资金量, 将其生产产量设置为最佳, 从而最大限度地提高自身利润。

当 $T < T_1$ 或 $T < T_2$ 时, 碳排放政策较为严格, 即低碳排放条件时, 再制造企业的新品产量与再制品产量不仅与生产中的相关参数有关, 还与碳排放阈值有关。此时, 新品产量与碳排放阈值正相关, 再制品产量与碳排放阈值负相关, 这是因为当政府加强绿色限制时, 再制造企业必须根据碳排放阈值将其产量设置为上限, 且由于单位新品的利润高于再制造产品, 随碳排放阈值的增加, 企业选择生产更多的新产品, 减少再制品产量。

2 低碳信贷对制造/再制造的价值分析

接下来分析当再制造企业自有资金不足时, 申请低碳信贷进行减排投资对企业生产决策的影响。

命题6: 当企业申请低碳信贷进行减排投资时, 与不考虑碳减排相比, 在高碳排放条件下有 $q_{2n}^H < q_{1n}$, $q_{2r}^H > q_{1r}$, $Q_2^H > Q_1$ 。

证明: 当企业自有资金不足时, $T \geq T_1$ 时, 有:

$$q_{2n}^H - q_{1n} = \frac{-\theta p_e B_t c_r (c_n - c_r)}{2[\varphi(c_n - c_r)^2 + (1-\varphi)c_r^2]} < 0$$

$$q_{2r}^H - q_{1r} = \frac{\theta p_e B_t c_n (c_n - c_r)}{2[\varphi(c_n - c_r)^2 + (1-\varphi)c_r^2]} > 0$$

$$Q_2^H - Q_1 = \frac{\theta p_e B_t (c_n - c_r)^2}{2[\varphi(c_n - c_r)^2 + (1-\varphi)c_r^2]} > 0$$

证毕。

命题6表明企业自有资金不足且考虑碳减排投资时, 企业的新品产量低于不考虑减排时的新品产量, 再制品产品和总产量高于不考虑减排时的产量。这是因为低碳信贷的申请条件对企业的碳排放量提出了要求, 企业为满足碳排放政策限制选择减少单位碳排放量更多的新品产量, 增加再制品产量。故碳排放政策较为宽松时, 低碳信贷会促进再制造产业的发展。

命题7: (1) 当 $T \geq T_1$ 时, 有 $\frac{\partial q_{2n}^H}{\partial B_t} < 0$, $\frac{\partial q_{2r}^H}{\partial B_t} > 0$;

(2) 当 $T < T_1$ 时, 有 $\frac{\partial q_{2n}^L}{\partial B_t} > 0$, $\frac{\partial q_{2r}^L}{\partial B_t} < 0$,

$\frac{\partial Q_2^L}{\partial B_t} < 0$ 。

证明: 当 $T \geq T_1$ 时:

$$\frac{\partial q_{2n}^H}{\partial B_t} = \frac{-\theta p_e c_r (c_n - c_r)}{2[\varphi(c_n - c_r)^2 + (1-\varphi)c_r^2]} < 0$$

$$\frac{\partial q_{2r}^H}{\partial B_t} = \frac{\theta p_e c_n (c_n - c_r)}{2[\varphi(c_n - c_r)^2 + (1-\varphi)c_r^2]} > 0$$

$$\frac{\partial Q_2^H}{\partial B_t} = \frac{\theta p_e (c_n - c_r)^2}{2[\varphi(c_n - c_r)^2 + (1-\varphi)c_r^2]} > 0$$

当 $T < T_1$ 时, 根据命题4中 $\lambda_2 > 0$, $\lambda_3 > 0$ 的情形可以解得:

$$\lambda_3 = \frac{(T_1 - T) / [2(\varphi c_n^2 - 2\varphi c_n c_r + c_r^2)]}{\theta B_t (c_n - c_r) [c_r (e_n - \theta B_t) - c_n (e_r - \theta B_t)]} > 0$$

得到 $c_r (e_n - \theta B_t) - c_n (e_r - \theta B_t) > 0$, 则有:

$$\frac{\partial q_{2n}^L}{\partial B_t} = \frac{\theta c_r (B e_n - B e_r + T c_r - T c_n)}{[c_r (e_n - \theta B_t) - c_n (e_r - \theta B_t)]^2}$$

$$= \frac{\theta c_r (q_{2n}^L + q_{2r}^L)}{c_r (e_n - \theta B_t) - c_n (e_r - \theta B_t)} > 0$$

$$\frac{\partial q_{2r}^L}{\partial B_t} = \frac{-\theta c_n (B e_n - B e_r + T c_r - T c_n)}{[c_r (e_n - \theta B_t) - c_n (e_r - \theta B_t)]^2} < 0$$

$$\frac{\partial Q_2^L}{\partial B_t} = \frac{-\theta (c_n - c_r) (q_{2n}^L + q_{2r}^L)}{c_r (e_n - \theta B_t) - c_n (e_r - \theta B_t)} < 0$$

证毕。

命题7表明在高碳排放条件下, 随着减排投资成本的增加, 新品产量减少, 再制品产量和总产量增加, 这是因为当碳排放上限较为宽松时, 减排投资使生产单位产品的成本降低, 鼓励企业总产量的增加; 在低碳排放条件下, 随着减排投资成本的增加, 新品产量增加, 再制品产量和总产量减少, 这是因为当碳排放上限较为严格时, 限制了企业的生产以控制总碳排放量, 同时企业自有资金有限, 选择增加单位利润较高的新品产量, 减少再制品产量。

3 数值分析

为验证上述模型的真实性和有效性, 代入相关数值进行分析。假设再制造企业生产的新品和再制品供应相同的市场。根据王永健和陈伟达^[11]

的研究,选取其中部分参数的取值: $Q=1000$ 、 $\varphi=0.6$ 、 $c_n=50$ 、 $c_r=25$ 、 $e_n=40$ 、 $e_r=10$ 、 $p_e=10$ 、 $L=4000$ 。

3.1 自有资金对生产决策的影响

基于以上参数,选取减排转化率 $\theta=\frac{1}{1000}$ 。同时,对于给定的碳排放上限 T ,高碳排放条件和低碳排放条件会限制减排投资额的取值范围,如当 $T=3000$ 时,高碳排放条件($T \geq T_2$)要求 $B_i \geq 9605.99$,低碳排放条件($T < T_2$)要求 $B_i < 9605.99$,因此选取高碳排放条件下减排投资额 $B_i=9700$,低碳排放条件下减排投资额 $B_i=5000$,分析自有资金 B 对企业不考虑减排和申请低碳信贷进行减排投资这两种情形下最优产量和利润的变化。图1(a)和(b)分别描述了不考虑减排和高碳或低碳排放条件下申请低碳信贷融资时自有资金对产量的影响。

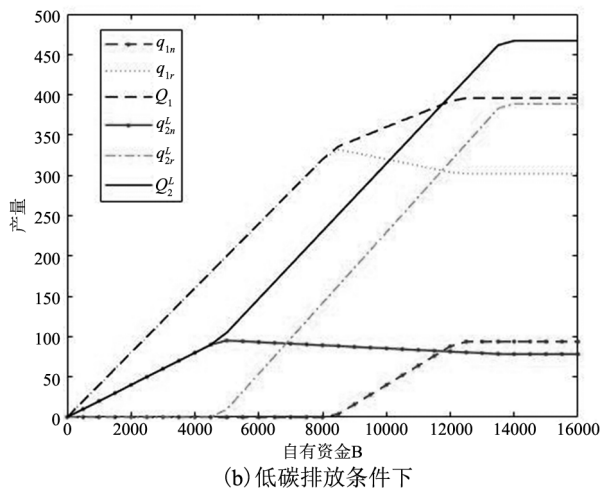
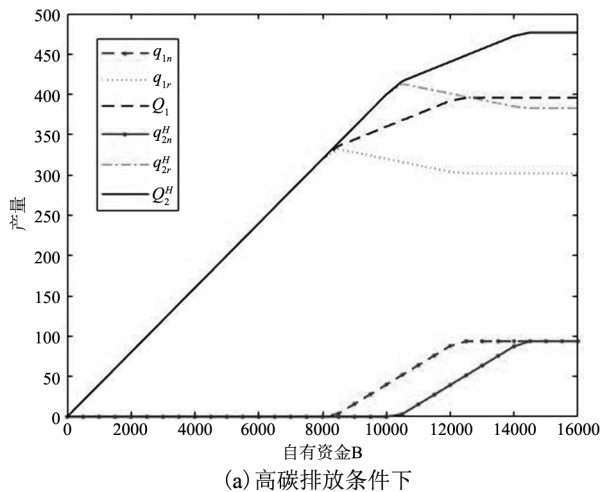


图1 自有资金对产量的影响

从图1(a)和(b)可以看出:

(1) 企业不考虑减排。当自有资金 $0 \leq B \leq 8333.33$ 时,再制造企业会将有限的资金全部用

于生产再制造品,新品产量为0;当 $8333.33 \leq B \leq 12240$ 时,再制造企业同时生产新品和再制造产品,随自有资金的增加,新品产量逐渐增加,再制造品产量逐渐减少,总产量增长变缓;当 $B \geq 12240$ 时,新品和再制造品的产量实现最优,并保持不变。这也验证了命题1~3。

(2) 在高碳排放条件下申请低碳信贷融资进行减排的产量变化趋势与不考虑减排时的产量变化趋势相似,但减排投资后的新品产量不高于不考虑减排时的新品产量,再制造品产量和总产量高于不考虑减排时的再制造品产量和总产量。说明高碳排放条件下,考虑低碳信贷进行碳减排会增加企业对再制造生产的投入,这也验证了命题6。

(3) 与不考虑减排相比,在低碳排放条件下申请低碳信贷融资进行碳减排后,当企业自有资金较少时($B < 4285.71$),企业选择将有限的资金全部用于生产新品,当 $4285.71 < B < 11463.07$ 时,随自有资金的增加,新品产量逐渐减少,再制造品产量逐渐增加,当 $4285.71 < B < 11463.07$ 时,新品产量和再制造品产量实现最优,并保持不变。同时,当 $B < 10000$ 时,减排投资后的再制造品产量和总产量低于不考虑减排时的产量,减排投资后的新品产量高于不考虑减排时的产量。因此,在低碳排放条件下,当企业自有资金不足时,申请低碳信贷融资进行减排投资可能会减少企业对再制造生产的投入,并限制企业的总产出,这也与Liu等^[23]的研究一致。

根据丁春刚等^[20]的研究,取低碳信贷融资的优惠贷款利率 $r=5\%$,3种情形下再制造企业的利润如图2所示。

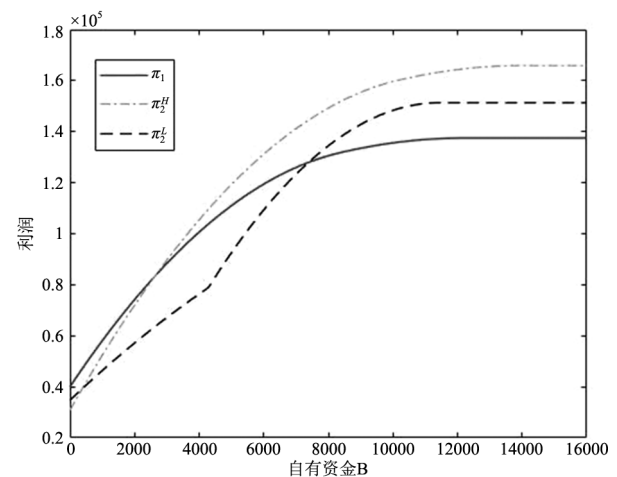


图2 自有资金对利润的影响

图2显示了当企业自有资金较少时,无论是

高碳排放条件,还是低碳排放条件下,申请低碳信贷融资后的利润总是低于不考虑减排时的利润,只有当再制造企业自有资金高于一定值时,减排投资后的利润才会高于不考虑减排时的利润,且在低碳排放条件下,再制造企业需要比高碳排放条件下拥有更多的自有资金才会选择减排投资。这是因为当企业自有资金较少时,企业产量较少,还需要额外的减排投资成本,此时的利润低于不考虑减排时的利润;随着自有资金的增加,总产量随之增加,此时的利润高于不考虑减排时的利润。

3.2 减排投资额 B_i 对生产决策的影响

单位产品的减排量与减排投资额密切相关,其对再制造企业的生产决策也会产生相应的影响。本文分析当企业自有资金不足时申请碳信贷融资进行碳减排 ($B = 10000$) 的最优产量和利润的变化。

同时,对于给定的碳排放上限 T ,高碳排放条件和低碳排放条件会限制减排投资额的取值范围,如当 $T = 3000$ 时,高碳排放条件 ($T \geq T_1$) 要求 $B_i \geq 3759.4212$,低碳排放条件 ($T < T_1$) 要求 $B_i < 3759.4212$ 。图3描述了减排投资额对产量的影响。

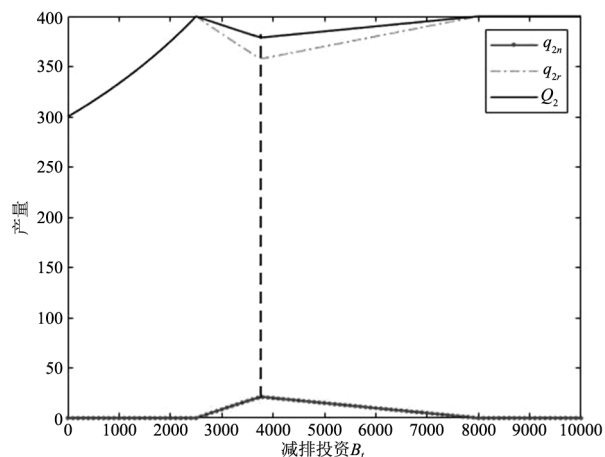


图3 减排投资额对产量的影响

从图3中可以看出:

(1) 在低碳排放条件下,由于严格的碳排放政策,当减排投资额 $B_i < 2500$ 时,再制造企业仅生产单位碳排放量较低的再制品,新品产量为0;随着减排投资额的增加 ($2500 \leq B_i \leq 3759.4212$),再制造企业开始逐渐增加新品产量,减少再制品产量和总产量。

(2) 在高碳排放条件下,随着减排投资额的增加 ($3759.4212 \leq B_i \leq 8000$),再制造企业逐渐减少新品产量,增加再制品和总产品产量;随

着减排投资额的进一步增加 ($B_i > 8000$),由于自有资金有限,再制造企业的最优产量保持不变。这也验证了命题7。

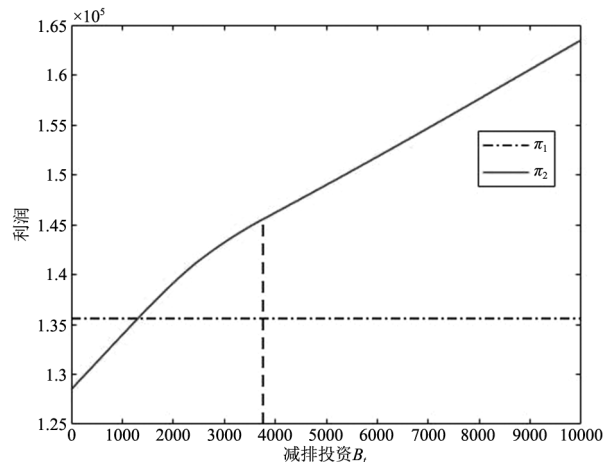


图4 减排投资对利润的影响

图4描述了减排投资额对利润的影响。可以看出,高碳排放条件下,减排投资后的利润总是高于不考虑减排的利润;低碳排放条件下,当减排投资额较小时,减排投资的利润低于不考虑减排的利润,此时,再制造企业不会考虑碳减排投资。这是因为当碳排放政策较为宽松时,增加的利润高于投入的减排成本;而当碳排放政策较为严格时,减排投资额较小,同时企业面临总碳排放量和总产量的约束,此时的利润低于不考虑减排时的利润。这也说明并不是碳排放政策越严格,越能刺激企业进行减排投资,反而相对宽松的碳排放政策更能激励企业申请低碳信贷进行减排技术的投入。

3.3 碳排放阈值对产量的影响

申请低碳信贷进行减排投资,会受到银行或政府规定的碳排放限制,碳排放阈值对产量会产生相应的影响。选取减排投资额 $B_i = 5000$,分析当企业自有资金不足时,申请碳信贷融资的碳排放阈值 T 对最优产量和利润的影响。

图5描述了碳排放阈值 T 对产量的影响。可以看出,当规定的碳排放阈值较低时,企业选择仅生产再制造产品;随着碳排放阈值的增加,新品产量逐渐增加,再制品产量和总产量逐渐减少;随着碳排放阈值的进一步增加,新品和再制品产量不变。这也验证了命题4。

图6描述了碳排放阈值对企业利润的影响,基线为不考虑减排时的利润。可以看出,当企业为满足低碳信贷申请条件时,碳排放阈值较低时,

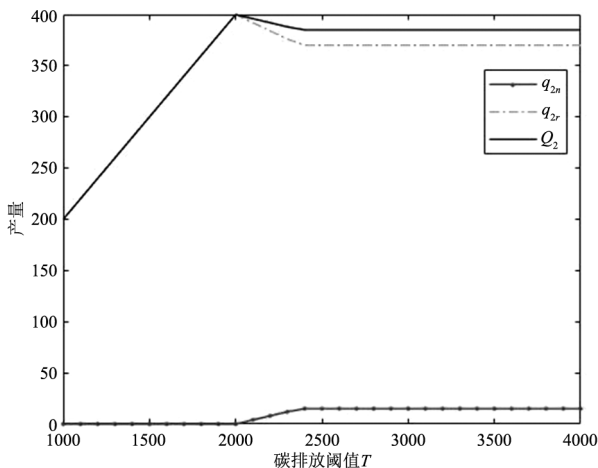


图5 碳排放阈值 T 对产量的影响

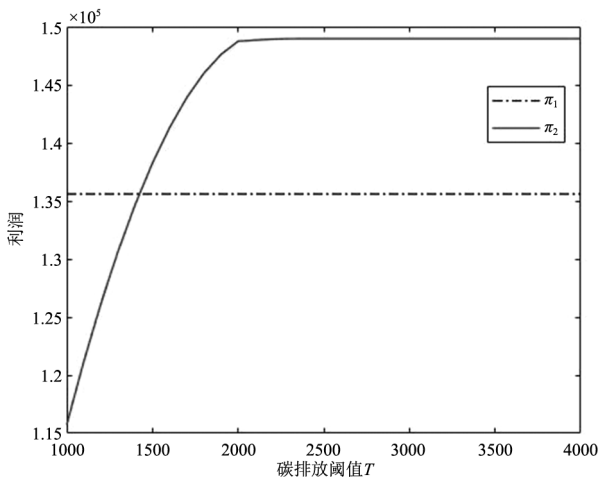


图6 碳排放阈值对利润的影响

减排后的利润低于不减排时的利润,企业不考虑申请低碳信贷进行减排投资,只有当碳排放阈值较高时,企业才会考虑减排技术的投资。

4 结论

本文探讨了碳限额与交易政策下,受资金约束的再制造企业考虑低碳信贷进行碳减排和不考虑减排时的生产决策问题。基于企业利润最大化,分析企业采用低碳信贷进行碳减排后的最优生产决策,并从产量和利润的角度分析低碳信贷的影响。本文的主要研究结论如下。

(1) 与不考虑减排相比,申请低碳信贷进行减排投资,在宽松的碳排放政策下,会增加再制造品产量和总产量,新品产量减少;在严格的碳排放政策下,当再制造企业拥有有限的自有资金时,新品产量增加,再制造品产量和总产量减少。故严格的碳排放政策可能会滞缓再制造行业的发展,并限制企业的产出,相对宽松的碳排放政策反而能促进再制造行业的发展。

(2) 当企业自有资金不足时,对于给定的碳

排放阈值,宽松的碳排放政策下,申请低碳信贷的利润总是高于不考虑减排时的利润;严格的碳排放政策下,只有当减排投资额较大时,再制造企业才会考虑申请低碳信贷。故政府可以设置相对宽松的碳排放政策,或在严格的碳排放政策下提供较高的低碳信贷申请额度,刺激企业进行减排技术的投入,并推动低碳信贷的发展。

(3) 对于给定的减排投资额,当碳排放阈值较低时,会增加再制造品产量,但企业利润低于不考虑减排时的利润;随着碳排放阈值的增加,再制造品产量先增加后减少,考虑减排时的利润高于不考虑减排时的利润。故政府可以设置合理的碳排放阈值促进再制造行业的发展以及企业申请低碳信贷进行减排技术投资。

但是,本文仅考虑企业进行单周期的生产。由于低碳信贷进行投资减排面临短期资金需求和中长期收益的问题,且银行对企业的环境评估是一个持续的过程,企业可能受银行停止贷款支持等不确定性因素的影响。未来可以针对这些方向进行进一步的研究。

参 考 文 献

[1] Zhu X, Ren M, Chu W, et al. Remanufacturing Subsidy or Carbon Regulation? An Alternative Toward Sustainable Production [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 117988.

[2] Zhang Y, Chen W. Optimal Production and Financing Portfolio Strategies for a Capital-constrained Closed-loop Supply Chain with OEM Remanufacturing [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123467.

[3] 黄燕婷, 王宗军. 技术许可下信息共享和政府补贴对闭环供应链的影响分析——基于经销商再制造模式 [J]. 运筹与管理, 2019, 28 (3): 57-66.

[4] 陈伟达, 胡善勇. 考虑预售融资模式的制造/再制造生产决策研究 [J]. 工业工程与管理, 2020, 25 (4): 16-24.

[5] An S, Li B, Song D, et al. Green Credit Financing Versus Trade Credit Financing in a Supply Chain with Carbon Emission Limits [J]. European Journal of Operational Research, 2021, 292 (1): 125-142.

[6] Dou G, Guo H, Zhang Q, et al. A Two-period Carbon Tax Regulation for Manufacturing and Remanufacturing Production Planning [J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 128: 502-513.

[7] 张焕勇, 李宇航, 韩云霞. 碳限额与交易机制下企业再制造生产决策研究 [J]. 软科学, 2018, 32 (6): 87-91.

[8] Hu X, Yang Z, Sun J, et al. Carbon Tax or Cap-and-trade: Which is More Viable for Chinese Remanufacturing Industry? [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 243: 118606.

[9] Chai Q, Xiao Z, Lai K. Can Carbon Cap and Trade Mechanism Be Beneficial for Remanufacturing? [J]. International Journal of

- Production Economics, 2018, 203: 311-321.
- [10] Zhao S, Zhu Q, Cui L. A Decision-making Model for Remanufacturers: Considering Both Consumers' Environmental Preference and the Government Subsidy Policy [J]. Resources Conservation & Recycling, 2018, 128: 176-186.
- [11] 王永健, 陈伟达. 考虑资金约束的再制造企业生产与融资综合决策研究 [J]. 管理工程学报, 2017, 31 (4): 140-146.
- [12] Wu D, Yang L, Olson D. Green Supply Chain Management Under Capital Constraint [J]. International Journal of Production Economics, 2019, 215: 3-10.
- [13] Yang H, Miao L, Zhao C. The Credit Strategy of a Green Supply Chain Based on Capital Constraints [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 224: 930-939.
- [14] 李超, 骆建文. 基于预付款的资金约束供应链收益共享协调机制 [J]. 管理学报, 2016, 13 (5): 763-771.
- [15] 张克勇, 李春霞, 姚建明. 考虑碳限额与销售努力的低碳供应链融资决策 [J]. 计算机工程与应用, 2020, 56 (22): 256-263.
- [16] 尤天慧, 刘春怡, 曹兵兵, 等. 制造商主导且回收商资金约束的闭环供应链融资模式选择策略 [J]. 管理学报, 2020, 17 (1): 139-147.
- [17] 高歌. 绿色信贷新趋势: 碳信贷的前世今生 [J]. 环境保护, 2010, (22): 27-29.
- [18] 杜莉, 韩丽娜. 论碳金融体系及其运行架构 [J]. 吉林大学社会科学学报, 2010, 50 (5): 55-61.
- [19] 李虹. 滨海新区碳信贷发展影响因素研究 [J]. 天津师范大学学报 (社会科学版), 2014, (4): 52-56.
- [20] 丁志刚, 许惠玮, 徐琪. 绿色信贷支持下供应链低碳技术采纳决策研究 [J]. 软科学, 2020, 34 (12): 74-80.
- [21] Chang X, Li Y, Zhao Y, et al. Effects of Carbon Permits Allocation Methods on Remanufacturing Production Decisions [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 152: 281-294.
- [22] 陈玉玉, 李帮义, 柏庆国, 等. 碳交易环境下再制造企业生产及减排投资决策 [J]. 控制与决策, 2020, 35 (3): 695-703.
- [23] Liu J, Xia Y, Fan Y, et al. Assessment of a Green Credit Policy Aimed at Energy-intensive Industries in China Based on a Financial CGE Model [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 163: 293-302.

Research on Manufacturing/Remanufacturing Production Decisions Considering Low-carbon Credit Financing

Chen Weida Dong Kaili

(School of Economics and Management, Southeast University, Nanjing 211189, China)

[Abstract] Driven by government policies, low-carbon credit is provided by banks to encourage enterprises to carry out energy-saving and emission reduction activities. Considering the limited self-owned capital of small and medium-sized remanufacturing enterprises, under the regulation of carbon cap-and-trade, the mathematical models without considering emission reduction and applying for low-carbon credit financing for emission reduction investment are constructed respectively, and the Kuhn-Tucker condition is used to solve the mathematical model. The impacts of self-owned capital, emission reduction investment and carbon emission threshold on the production decisions of remanufacturing enterprises are obtained through numerical experiments. The research results show that strict carbon emission policies may slow down the development of the remanufacturing industry and limit the output of enterprises. On the contrary, relatively loose carbon emission policies can promote the development of the remanufacturing industry. For enterprises with self-owned capital constraint, the government can formulate relatively loose carbon emission policies or reasonable carbon emission threshold to stimulate enterprises to invest emission reduction technologies and promote the development of low-carbon credit.

[Key words] low-carbon credit; carbon cap-and-trade; manufacturing/remufacturing; emission reduction investment; production decisions; carbon emission threshold

[Jel classification] G32; M11

(责任编辑: 张舒逸)