

# 基于绿色技术创新和制造商竞争的 绿色供应链微分博弈研究

刘丽 韩同银 金浩

**【摘要】**引入绿色技术创新过程,构建由单个共享供应商和两个制造商组成的绿色供应链,利用随机停止模型刻画绿色技术创新对绿色研发投入决策的影响,基于微分博弈研究供应链的绿色研发投入决策与协调。研究发现:较高的技术创新成功概率率和绿色度提升率能够激励企业增加技术创新成功前的绿色研发投入,提高产品绿色度;绿色技术创新对制造商绿色研发投入的影响程度与绿色竞争强度有关;双向成本分担契约可以协调供应链,其中共享供应商对制造商绿色研发投入成本的分担比例与绿色竞争强度负相关,而两个制造商对共享供应商绿色研发投入成本的分担比例之和是确定的。

**【关键词】**绿色技术创新;制造商竞争;绿色供应链;微分博弈

**【作者简介】**刘丽,河北工业大学经济管理学院;韩同银(通讯作者)(1962-),男,山东菏泽人,河北工业大学(天津市300401)经济管理学院教授、博士研究生导师,研究方向为物流与供应链管理、建筑经济与项目管理,E-mail:15511336888@126.com;金浩,河北工业大学经济管理学院。

**【原文出处】**《管理学报》(武汉),2023.1.116~126

**【基金项目】**国家社会科学基金资助项目(19BGL054);国家社会科学基金资助青年项目(20CRK010)。

## 1 研究背景

促进经济社会发展全面绿色转型是我国在新时代的重要战略部署,为我国制造企业的转型升级提供了方向指引和根本遵循<sup>[1-3]</sup>。在绿色产品市场,制造企业进行绿色转型和增强市场竞争力的根本途径是绿色技术创新,即通过绿色技术研发与积累形成自身核心技术<sup>[2]</sup>,如奇瑞、比亚迪等车企研发新能源汽车。从供应链视角来看,供应商的绿色技术创新(如开发绿色环保型原材料,设计使用过程中能耗更低的零部件)在电子产品、汽车、家电等供应链中占有重要地位,是制造商生态设计的基础。然而在实际研发过程中,面临技术、市场及政策等方面的不确定因素,绿色技术创新能否成功以及何时成功具有较大的不确定性<sup>[4]</sup>。以动力电池为例,面临材料技术升级、市场形态不确定(电动能还是氢动能)、新能源汽车补贴退坡等因素,其性能何时实现技术突破尚不确定。

事实上,一家供应商往往会向多家制造商提供原材料或零部件,比如宁德时代同时向上汽、广汽、吉利等车企提供动力电池,本研究将此类供应商称为共享供应商<sup>[5]</sup>。现阶段,为了解决动力电池续航里程短、充电慢、成本高等问题<sup>[6]</sup>,诸多车企纷纷与电池供应商合作,共同促进动力电池的技术创新。例如,上汽、广汽分别与宁德时代就动力电池系统的研发达成战略合作协议<sup>①②</sup>;同时,具有市场竞争关系的广汽与上汽也签署了战略合作协议,联合投资、开发新能源领域的核心技术<sup>③</sup>。因此,研究竞争性制造商和共享供应商的绿色研发投入决策与合作契约,对于实现供应链绿色发展具有重要意义。

绿色技术创新是绿色时代下技术创新的崭新形态,强调在经济高质量发展的同时尽可能地减少对资源环境的危害<sup>[2,3]</sup>。绿色技术创新过程同传统技术创新过程相似,可以划分为渐进性技术创新和突破性技术创新。蒋军锋等<sup>[7]</sup>指出,渐进性技术创新主要是对现有技术的改良和利用,而突破性技术创新能够实现技术性能的重大跃迁。其中,突破性技术创新过程是一个跳跃过程,实现时间具有不确定性<sup>[8]</sup>。已有研究表明,环境规制<sup>[2,9]</sup>、市场导向<sup>[10,11]</sup>、企业绩效<sup>[12]</sup>等是驱动企业实施绿色技术创新的主要因素,而且企业实施绿色技术创新可以改善环境声誉,获得绿色竞争优势,增加经济利润和环境效益,即具有双重效应<sup>[12-14]</sup>。

近年来,国内外学者将企业绿色技术创新的研究拓展至供应链管理范畴,即绿色供应链管理。曹裕等<sup>[15]</sup>、

LI 等<sup>[16]</sup>研究发现,政府补贴能够激励供应链成员的绿色技术创新行为。江世英等<sup>[17]</sup>、XU 等<sup>[18]</sup>、周艳菊等<sup>[19]</sup>通过设计收益共享契约、批发价契约、成本分担契约和两部制契约等,促进绿色供应链上下游企业的绿色技术创新合作,协调绿色供应链。在竞争环境下,WANG 等<sup>[20]</sup>研究制造商在同时生产绿色产品和普通产品时的绿色技术创新投资策略。MA 等<sup>[21]</sup>研究绿色制造商和普通制造商竞争情形下的绿色产品定价与绿色度决策,并设计了协调契约。李思凝等<sup>[22]</sup>基于新能源汽车供应链,研究具有竞争关系的新能源汽车制造商在不同权力结构下与技术服务商的合作创新策略。LIU 等<sup>[23]</sup>研究制造商竞争和零售商竞争对绿色环保企业盈利能力的影响。许格妮等<sup>[24]</sup>研究两条竞争性绿色供应链对不同绿色技术创新成本分担模式的策略选择。然而,上述文献均是基于静态框架,并未考虑企业生产运营的长期性和持续性。进一步,一些学者基于微分博弈研究动态框架下供应链的绿色技术创新问题。例如,WEI 等<sup>[25]</sup>研究企业与政府的减排技术创新互动机制。游达明等<sup>[26]</sup>研究制造商与零售商的生态研发努力与促销努力。关志民等<sup>[27]</sup>研究制造商与供应商的协同绿色创新优化,并设计了双向成本分担契约。朱桂菊等<sup>[28]</sup>研究制造商联合供应商进行生态技术创新的最优生态研发努力,并设计了利润分配契约。LIU 等<sup>[29]</sup>从不同权力结构视角,分析收益共享契约和成本分担契约对于提高产品绿色度哪个更有效。

综上所述,关于绿色技术创新和绿色供应链管理已有许多研究成果,但现有关于绿色供应链管理的研究主要集中于静态框架。文献[25~29]将研究内容拓展至动态框架,但并未考虑竞争因素。此外,以上研究均未考虑绿色技术创新是一个过程。因此,本研究构建由单个共享供应商和两个制造商组成的绿色供应链,借鉴胡劲松等<sup>[30]</sup>的研究,利用随机停止模型,刻画绿色技术创新对供应链成员绿色研发投入决策的影响,基于微分博弈研究分散、集中决策情形下供应链成员在技术创新成功前后的绿色研发投入,并设计契约协调绿色供应链。

## 2 问题描述与模型假定

### 2.1 问题描述与基本假设

本研究以单个共享供应商与两个制造商  $M_i (i=1,2)$  组成的绿色供应链为研究对象,其中共享供应商负责生产关键零部件并提供给两个制造商,而制造商  $M_i$  负责生产并销售绿色产品  $i$ 。两种绿色产品在功能使用上无任何差别,但存在绿色度差异。为了实现绿色转型,共享供应商和两个制造商均积极投入绿色研发资金,力争攻克绿色技术难题。共享供应商每一时刻的决策变量为绿色研发投入  $S(t)$ ,制造商  $M_i$  每一时刻的决策变量为绿色研发投入  $Z_i(t)$ ,并且共享供应商和制造商  $M_i$  进行 Nash 博弈,同时决策各自的绿色研发投入。由于绿色技术创新的实现具有不确定性,所以共享供应商和制造商  $M_i$  在预测到未来存在绿色技术创新时,需要合理决策技术创新成功前后的绿色研发投入,进而实现资源的合理配置。决策顺序:共享供应商和制造商  $M_i$  首先以各自在整个运营期间的利润最大化为目标,来决策技术创新成功前的绿色研发投入;然后以各自在技术创新成功后阶段的利润最大化为目标,来决策技术创新成功后的绿色研发投入。

本研究的相关假设如下:

**假设 1** 供应商和制造商的绿色研发投入越多,产品的绿色度就越高<sup>[27,28]</sup>;与此同时,由于现有绿色技术水平和投资设备的落后,产品绿色度存在自然衰减现象<sup>[29]</sup>。因此,借鉴文献[27~29]的研究,将产品绿色度的动态变化过程刻画为

$$\dot{g}_i(t) = \alpha S(t) + \beta Z_i(t) - \varepsilon g_i(t), g_i(0) = g_0, \quad (1)$$

式中, $g_i(t)$  表示  $t$  时刻绿色产品  $i$  的绿色度; $g_0$  为产品绿色度的初始值; $\alpha > 0$  和  $\beta > 0$  分别表示共享供应商和制造商  $M_i$  的绿色研发投入对产品绿色度的影响系数; $\varepsilon > 0$  表示产品绿色度的衰减率。

**假设 2** 借鉴文献[24,26]的研究,假设共享供应商和制造商  $M_i$  的绿色研发投入成本分别为  $kS^2(t)/2$  和  $h_i Z_i^2(t)/2$ ,其中  $k > 0$  和  $h_i > 0$  分别表示共享供应商和制造商  $M_i$  的绿色研发投入成本系数。此外,本研究仅考虑绿色供应链成员进行绿色研发投入的情形,即  $S(t) > 0$  和  $Z_i(t) > 0$ 。

**假设 3** 假设两个制造商生产的绿色产品在销售市场上存在绿色竞争关系。借鉴文献[23,24]的研究,将绿色竞争关系通过市场需求函数来表示,即绿色产品  $i$  的市场需求函数为

$$D_i(t) = D_0 + \gamma g_i(t) - \chi_g \gamma (g_j(t) - g_i(t)), \quad (2)$$

式中, $D_i(t)$  表示  $t$  时刻绿色产品  $i$  的市场需求函数; $D_0$  表示绿色产品  $i$  的潜在市场需求; $\gamma > 0$  表示产品绿色度

对市场的影响系数,即消费者的绿色偏好系数; $0 < \chi_g \leq 1$  表示制造商之间的绿色竞争强度; $i=1,2;j=3-i$ 。

假设4 共享供应商和制造商  $M_i$  的边际利润分别为  $\pi_s > 0$  和  $\pi_i > 0$ , 并且在整个运营期间内的贴现率均为  $\rho > 0$ 。

## 2.2 绿色技术创新的发展过程

绿色技术创新过程是一个跳跃过程,实现时间具有不确定性<sup>[8,30]</sup>。借鉴胡劲松等<sup>[30]</sup>的研究,假设  $\{ \Gamma(t) : t \geq 0 \}$  表示绿色技术创新的整个过程,企业可能在任意时刻  $t$  实现绿色技术创新,其概率为  $\tau \in [0,1]$ , 那么  $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} P \{ t \leq T < t + \Delta t | T \geq t \} / \Delta t = \tau$ 。其中,条件概率  $P \{ t \leq T < t + \Delta t | T \geq t \}$  表示绿色技术创新在  $t$  时刻没有实现而在  $[t, t + \Delta t)$  内实现的概率; $\tau \in [0,1]$  表示技术创新成功概率。进一步,令  $F(t)$  和  $f(t)$  分别表示绿色技术创新过程的分布函数和概率密度,那么  $F(t) = 1 - e^{-\tau t}$ ,  $f(t) = \tau e^{-\tau t}$ 。绿色技术创新的发展过程见图1。

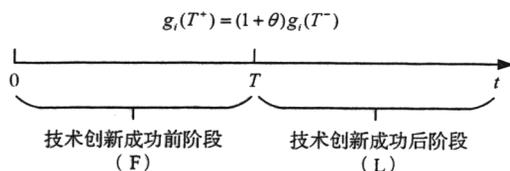


图1 绿色技术创新的发展过程

由图1可知,以绿色技术创新成功日期  $T$  划分企业的运营时间段为技术创新成功前  $t \in [0, T)$  和技术创新成功后  $t \in [T, \infty)$ , 并且用  $r=F, L$  分别表示技术创新成功前后两个阶段。假设  $g_i(T^+) = (1 + \theta)g_i(T^-)$ , 其中  $g_i(T^+)$  和  $g_i(T^-)$  分别表示技术创新成功前后的绿色产品  $i$  的产品绿色度,  $\theta > 0$  表示绿色度提升率。因此,将绿色技术创新下产品绿色度的动态变化过程刻画为

$$\begin{cases} \dot{g}_{iF}(t) = \alpha_F S_F(t) + \beta_F Z_{iF}(t) - \varepsilon_F g_{iF}(t), g_{iF}(0) = g_0, 0 \leq t < T; \\ \dot{g}_{iL}(t) = \alpha_L S_L(t) + \beta_L Z_{iL}(t) - \varepsilon_L g_{iL}(t), g_{iL}(T^+) = (1 + \theta)g_{iL}(T^-), T \leq t, \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\alpha_L > \alpha_F, \beta_L > \beta_F, \varepsilon_F > \varepsilon_L$  表示与技术创新成功前相比,技术创新成功后产品绿色度受绿色研发投入的影响更大,但衰减率更小<sup>[30]</sup>。此外,假设  $\pi_{sL} > \pi_{sF}$  和  $\pi_{iL} > \pi_{iF}$ , 即技术创新成功后共享供应商和制造商  $M_i$  的盈利能力提高。

## 2.3 绿色供应链成员的利润函数

基于上述假设,由于技术创新成功前后绿色供应链成员的经营能力和市场环境发生变化,所以供应链成员会分别制定技术创新成功前后的最优策略。

技术创新成功前,共享供应商和制造商  $M_i$  的利润函数分别为

$$J_{sF} = \int_0^T e^{-\rho t} (\pi_{sF} (2D_0 + \gamma g_{1F} + \gamma g_{2F}) - k S_F^2 / 2) dt; \quad (4)$$

$$J_{mF} = \int_0^T e^{-\rho t} (\pi_{iF} (D_0 + \gamma g_{iF} - \chi_g \gamma (g_{jF} - g_{iF})) - h_i Z_{iF}^2 / 2) dt, \quad (5)$$

式中,  $J_{sF}$  和  $J_{mF}$  分别表示在技术创新成功前阶段  $[0, T)$ , 共享供应商和制造商  $M_i$  的利润在初始时刻的贴现值。

技术创新成功后,共享供应商和制造商  $M_i$  的利润函数分别为

$$J_{sL} = \int_T^\infty e^{-\rho t} (\pi_{sL} (2D_0 + \gamma g_{1L} + \gamma g_{2L}) - k S_L^2 / 2) dt; \quad (6)$$

$$J_{mL} = \int_T^\infty e^{-\rho t} (\pi_{iL} (D_0 + \gamma g_{iL} - \chi_g \gamma (g_{jL} - g_{iL})) - h_i Z_{iL}^2 / 2) dt, \quad (7)$$

式中,  $J_{sL}$  和  $J_{mL}$  分别表示在技术创新成功后阶段  $[T, \infty)$ , 共享供应商和制造商  $M_i$  的利润在  $T$  时刻的贴现值。

由于绿色技术创新成功的时间  $T$  具有不确定性,且共享供应商和制造商  $M_i$  在技术创新成功前后两个阶段的利润与技术创新成功的时间  $T$  密切相关,因此共享供应商和制造商  $M_i$  的利润是随机变量。进一步,通过对随机时间  $T$  取期望值,可得共享供应商和制造商  $M_i$  在整个运营期间的利润的期望净现值分别为  $J_s = E[J_{sF} + e^{-\rho T} J_{sL}]$  和  $J_m = E[J_{mF} + e^{-\rho T} J_{mL}]$ 。其中,  $J_s$  和  $J_m$  分别表示共享供应商和制造商  $M_i$  在整个运营期间的利润在初始时刻的贴现值。为了求解绿色技术创新这个随机控制问题,利用概率密度函数  $f(t) = \tau e^{-\tau t}$  对  $J_s = E[J_{sF} + e^{-\rho T} J_{sL}]$  和  $J_m = E[J_{mF} + e^{-\rho T} J_{mL}]$

$e^{-\rho t} J_{M_i}]$  求解可得,共享供应商和制造商  $M_i$  在整个运营期间利润的期望净现值函数分别为

$$J_S = \int_0^{\infty} e^{-(\rho+\tau)t} (\pi_{SF}(2D_0 + \gamma g_{1F} + \gamma g_{2F}) - kS_F^2/2 + \tau J_{SL}(S_L)) dt; \quad (8)$$

$$J_{M_i} = \int_0^{\infty} e^{-(\rho+\tau)t} (\pi_{iF}(D_0 + \gamma g_{iF} - \chi_g \gamma (g_{jF} - g_{iF})) - h_i Z_{iF}^2/2 + \tau J_{M_iL}(Z_{iL})) dt. \quad (9)$$

### 3 模型构建与求解

#### 3.1 分散决策模型(D)

在分散决策模型中,为了攻克绿色技术难题,提高产品绿色度,共享供应商和两个制造商分别以自身利润最大化为原则来制定技术创新成功前后两种环境下的绿色研发投入策略。因此,共享供应商和制造商  $M_i$  的最优控制问题分别为

$$\max_{S_F, S_L} J_S^D = \int_0^{\infty} e^{-(\rho+\tau)t} (\pi_{SF}(2D_0 + \gamma g_{1F} + \gamma g_{2F}) - kS_F^2/2 + \tau J_{SL}^D(S_L)) dt; \quad (10)$$

$$\max_{Z_i, Z_{iL}} J_{M_i}^D = \int_0^{\infty} e^{-(\rho+\tau)t} (\pi_{iF}(D_0 + \gamma g_{iF} - \chi_g \gamma (g_{jF} - g_{iF})) - h_i Z_{iF}^2/2 + \tau J_{M_iL}^D(Z_{iL})) dt. \quad (11)$$

**命题 1** 在分散决策模型中,共享供应商和制造商  $M_i$  在技术创新成功前后的最优绿色研发投入分别为

$$S_F^{D^*} = \frac{2\gamma\alpha_F \Delta\pi_{SF}}{k(\rho+\tau+\varepsilon_F)(\rho+\varepsilon_L)}, S_L^{D^*} = \frac{2\gamma\alpha_L \pi_{SL}}{k(\rho+\varepsilon_L)}; \quad (12)$$

$$Z_{iF}^{D^*} = \frac{\gamma\beta_i(1+\chi_g)\Delta\pi_{iF}}{h_i(\rho+\tau+\varepsilon_F)(\rho+\varepsilon_L)}, Z_{iL}^{D^*} = \frac{\gamma\pi_{iL}\beta_L(1+\chi_g)}{h_i(\rho+\varepsilon_L)}, \quad (13)$$

式中,  $\Delta\pi_{iF} = \pi_{iF}(\rho+\varepsilon_L) + \tau\pi_{iF}(1+\theta)$ ,  $\Delta\pi_{SF} = \pi_{SF}(\rho+\varepsilon_L) + \tau\pi_{SF}(1+\theta)$ 。

产品绿色度的动态变化过程为

$$g_i^D(t) = \begin{cases} (g_0 - \bar{g}_{iF}^D) e^{-Ft} + \bar{g}_{iF}^D, & t \in [0, T); \\ (((g_0 - \bar{g}_{iF}^D) e^{-Tt} + \bar{g}_{iF}^D)(1+\theta) - \bar{g}_{iF}^D) \cdot e^{-L(t-T)} + \bar{g}_{iF}^D, & t \in [T, \infty), \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $\bar{g}_{iF}^D = \gamma(2h_i\alpha_i^2\Delta\pi_{SF} + k\beta_i^2(1+\chi_g)\Delta\pi_{iF}) / (kh_i\varepsilon_F(\rho+\tau+\varepsilon_F)(\rho+\varepsilon_L))$ ,  $\bar{g}_{iL}^D = \gamma(2h_i\alpha_i^2\pi_{SL} + k\beta_L^2(1+\chi_g)\pi_{iL}) / (kh_i\varepsilon_L(\rho+\varepsilon_L))$  分别表示在分散决策模型中,技术创新成功前后两个阶段的产品绿色度稳态值。

共享供应商和制造商  $M_i$  在整个运营期间期望利润的最优值函数分别为  $V_S^D = a_1^* g_{1F}^D + a_2^* g_{2F}^D + a_3^*$ ,  $V_{M_i}^D = a_4^* g_{iF}^D + a_5^* g_{jF}^D + a_6^*$ , 进一步可得绿色供应链在整个运营期间期望利润的最优值函数为  $V^D = V_S^D + \sum_{i=1}^2 V_{M_i}^D$ 。其中,  $a_1^* = a_2^* = \gamma\Delta\pi_{SF} / ((\rho+\tau+\varepsilon_F)(\rho+\varepsilon_L))$ ,  $a_3^* = (2D_0(\rho\pi_{SF} + \tau\pi_{SL}) + \tau A_1 + \rho A_2) / (\rho(\rho+\tau))$ ,  $a_4^* = \gamma(1+\chi_g)\Delta\pi_{iF} / ((\rho+\tau+\varepsilon_F)(\rho+\varepsilon_L))$ ,  $a_5^* = -\chi_g\Delta\pi_{iF} / ((\rho+\tau+\varepsilon_F)(\rho+\varepsilon_L))$ ,  $a_6^* = (2D_0(\rho\pi_{iF} + \tau\pi_{iL}) + \tau A_3 + \rho A_4) / (2\rho(\rho+\tau))$ ,  $A_1 = \beta_L^2\gamma^2\pi_{SL}(1+\chi_g)(h_j\pi_{iL} + h_i\pi_{jL}) / (h_i h_j (\rho+\varepsilon_L)^2) + 2\gamma^2\alpha_L^2\pi_{SL}^2 / (k(\rho+\varepsilon_L)^2)$ ,  $A_2 = \beta_F^2\gamma^2(1+\chi_g)\Delta\pi_{SF}(h_j\Delta\pi_{iF} + h_i\Delta\pi_{jF}) / (h_i h_j (\rho+\tau+\varepsilon_F)^2(\rho+\varepsilon_L)^2) + 2\alpha_F^2\gamma^2\Delta\pi_{SF}^2 / (k(\rho+\tau+\varepsilon_F)^2(\rho+\varepsilon_L)^2)$ ,  $A_3 = \beta_L^2\gamma^2(1+\chi_g)\pi_{iL}((1+\chi_g)h_j\pi_{iL} - 2\chi_g h_i\pi_{jL}) / (h_i h_j (\rho+\varepsilon_L)^2) + 4\gamma^2\alpha_L^2\pi_{iL}\pi_{SL} / (k(\rho+\varepsilon_L)^2)$ ,  $A_4 = \beta_F^2\gamma^2\Delta\pi_{iF}(1+\chi_g)((1+\chi_g)h_j\Delta\pi_{iF} - 2\chi_g h_i\Delta\pi_{jF}) / (h_i h_j (\rho+\tau+\varepsilon_F)^2(\rho+\varepsilon_L)^2) + 4\gamma^2\alpha_F^2\Delta\pi_{iF}\Delta\pi_{jF} / (k(\rho+\tau+\varepsilon_F)^2(\rho+\varepsilon_L)^2)$ 。

**证明** 为了实现利润最大化,共享供应商和制造商  $M_i$  需要分别实现技术创新成功前后两个阶段的利润最大化。采用逆向归纳法求解,首先解决技术创新成功后共享供应商和制造商  $M_i$  的最优策略。由式(6)和式(7),根据贝尔曼连续动态优化理论,建立技术创新成功后共享供应商和制造商  $M_i$  的 HJB 方程分别为

$$\rho W_S^D = \max_{S_i} (\pi_{SL}(2D_0 + \gamma g_{iL} + \gamma g_{jL}) - kS_L^2/2 + W_S^D(g_{iL})(\alpha_L S_L + \beta_L Z_{iL} - \varepsilon_L g_{iL}) + W_S^D(g_{jL})(\alpha_L S_L + \beta_L Z_{jL} - \varepsilon_L g_{jL})); \quad (15)$$

$$\rho W_{M_i}^D = \max_{Z_i} (\pi_{iL}(D_0 + \gamma g_{iL} - \chi_g \gamma (g_{jL} - g_{iL})) - h_i Z_{iL}^2/2 + W_{M_i}^D(g_{iL})(\alpha_L S_L + \beta_L Z_{iL} - \varepsilon_L g_{iL}) + W_{M_i}^D(g_{jL})(\alpha_L S_L + \beta_L Z_{jL} - \varepsilon_L g_{jL})), \quad (16)$$

式中,  $W_S^D$  和  $W_{M_i}^D$  分别表示分散决策模型中共享供应商和制造商  $M_i$  在技术创新成功后阶段的最优价值函数。将式(15)和式(16)右端分别对  $S_L$  和  $Z_{iL}$  求一阶导数,由一阶条件可得

$$S_L^D = \frac{\alpha_L(W_S^{D'}(g_{iL}) + W_S^{D'}(g_{jL}))}{k}, Z_{iL}^D = \frac{\beta_L W_{M_i}^{D'}(g_{iL})}{h_i}. \quad (17)$$

将式(17)分别代入式(15)和式(16),可得

$$\rho W_S^D = 2\pi_{SL} D_0 + \frac{\alpha_L^2(W_S^{D'}(g_{iL}) + W_S^{D'}(g_{jL}))^2}{2k} + \sum_{i=1}^2 ((\pi_{SL}\gamma - W_S^{D'}(g_{iL})\varepsilon_L)g_{iL} + \frac{\beta_L^2 W_{M_i}^{D'}(g_{iL})W_S^{D'}(g_{iL})}{h_i}); \quad (18)$$

$$\rho W_{M_i}^D = (\pi_{iL}\gamma(1 - \chi_g) - W_{M_i}^{D'}(g_{iL})\varepsilon_L)g_{iL} - (\pi_{iL}\chi_g\gamma + W_{M_i}^{D'}(g_{jL})\varepsilon_L)g_{jL} + \pi_{iF}D_0 + \frac{\alpha_L^2(W_S^{D'}(g_{iF}) + W_S^{D'}(g_{jL})) (W_{M_i}^{D'}(g_{iF}) + W_{M_i}^{D'}(g_{jL}))}{k} + \frac{\beta_L^2 W_{M_i}^{D'}(g_{iF})^2}{2h_i} + \frac{\beta_L^2 W_{M_i}^{D'}(g_{jL})W_{M_i}^{D'}(g_{jL})}{h_j}. \quad (19)$$

根据式(18)和式(19)的结构,可以假设共享供应商和制造商  $M_i$  在技术创新成功后阶段的最优价值函数分别为  $W_S^D = n_1 g_{iL} + n_2 g_{jL} + n_3$ ,  $W_{M_i}^D = n_4 g_{iL} + n_5 g_{jL} + n_6$ ; 然后,将其分别代入式(18)和式(19),根据恒等关系能够确定参数  $n_1^* = n_2^* = \gamma\pi_{SL}/(\rho + \varepsilon_L)$ ,  $n_3^* = (2D_0\pi_{SL} + A_1)/\rho$ ,  $n_4^* = \gamma\pi_{iL}(1 + \chi_g)/(\rho + \varepsilon_L)$ ,  $n_5^* = -\chi_g\pi_{jL}/(\rho + \varepsilon_L)$ ,  $n_6^* = (2D_0\pi_{iL} + A_3)/2\rho$ ,进而可得  $W_S^D = n_1^* g_{iL} + n_2^* g_{jL} + n_3^*$ ,  $W_{M_i}^D = n_4^* g_{iL} + n_5^* g_{jL} + n_6^*$ 。进一步,将  $W_S^D$  和  $W_{M_i}^D$  代入式(17),化简可得  $S_L^D$  和  $Z_{iL}^D$ ,然后根据式(3)计算得到技术创新成功后产品  $i$  的绿色度。

根据  $g_i(T^*) = (1 + \theta)g_i(T)$  以及式(10)和式(11),可得共享供应商和制造商  $M_i$  在整个运营期间的 HJB 方程分别为

$$(\rho + \tau)V_S^D = \max_{S_F} (\pi_{SF}(2D_0 + \gamma g_{iF} + \gamma g_{jF}) - kS_F^2/2 + \tau W_S^D((1 + \theta)g_{iF}, (1 + \theta)g_{jF}) + V_S^{D'}(g_{iF})(\alpha_F S_F + \beta_F Z_{iF} - \varepsilon_F g_{iF}) + V_S^{D'}(g_{jF})(\alpha_F S_F + \beta_F Z_{jF} - \varepsilon_F g_{jF})); \quad (20)$$

$$(\rho + \tau)V_{M_i}^D = \max_{Z_{iF}} (\pi_{iF}(D_0 + \gamma g_{iF} - \chi_g \gamma (g_{jF} - g_{iF})) - h_i Z_{iF}^2/2 + \tau W_{M_i}^D((1 + \theta)g_{iF}, (1 + \theta)g_{jF}) + V_{M_i}^{D'}(g_{iF})(\alpha_F S_F + \beta_F Z_{iF} - \varepsilon_F g_{iF}) + V_{M_i}^{D'}(g_{jF})(\alpha_F S_F + \beta_F Z_{jF} - \varepsilon_F g_{jF})), \quad (21)$$

式中,  $V_S^D$  和  $V_{M_i}^D$  分别表示分散决策模型下共享供应商和制造商  $M_i$  在整个运营期间的最优价值函数。将式(20)和式(21)右端分别对  $S_F$  和  $Z_{iF}$  求一阶导数,由一阶条件可得

$$S_F = \frac{\alpha_F(V_S^{D'}(g_{iF}) + V_S^{D'}(g_{jF}))}{k}, Z_{iF}^D = \frac{\beta_F V_{M_i}^{D'}(g_{iF})}{h_i}. \quad (22)$$

将式(22)分别代入式(20)和式(21),化简可得

$$(\rho + \tau)V_S^D = (\pi_{SF}\gamma + \tau n_1^*(1 + \theta) - \varepsilon_F V_S^D(g_{iF}))g_{iF} + (\pi_{SF}\gamma + \tau n_2^*(1 + \theta) - \varepsilon_F V_S^D(g_{jF}))g_{jF} + 2\pi_{SF}D_0 + \tau n_3^* + \frac{\alpha_F^2(V_S^{D'}(g_{iF}) + V_S^{D'}(g_{jF}))^2}{2k} + \frac{\beta_F^2 V_{M_i}^{D'}(g_{jF})V_S^{D'}(g_{jF})}{h_2} + \frac{\beta_F^2 V_{M_i}^{D'}(g_{iF})V_S^{D'}(g_{iF})}{h_1}; \quad (23)$$

$$(\rho + \tau)V_{M_i}^D = (\pi_{iF}\gamma(1 + \chi_g) + \tau n_4^*(1 + \theta) - \varepsilon_F V_{M_i}^D(g_{iF}))g_{iF} + (-\pi_{iF}\chi_g\gamma + \tau n_5^*(1 + \theta) - \varepsilon_F V_{M_i}^D(g_{jF}))g_{jF} + \pi_{iF}D_0 + (V_S^{D'}(g_{iF}) + V_S^{D'}(g_{jF})) \frac{\alpha_F^2(V_{M_i}^{D'}(g_{iF}) + V_{M_i}^{D'}(g_{jF}))}{k} + \frac{\beta_F^2 V_{M_i}^{D'}(g_{iF})^2}{2h_i} + \frac{\beta_F^2 V_{M_i}^{D'}(g_{jF})V_{M_i}^{D'}(g_{jF})}{h_j} + \tau n_6^*. \quad (24)$$

根据式(23)和式(24)的结构,可以假设共享供应商和制造商  $M_i$  在整个运营期间的最优价值函数分别为  $V_S^D = a_1 g_{iF} + a_2 g_{jF} + a_3$ ,  $V_{M_i}^D = a_4 g_{iF} + a_5 g_{jF} + a_6$ ; 然后将  $V_S^D$  和  $V_{M_i}^D$  分别代入式(23)和式(24),根据恒等关系确定参数  $a_1^* \sim a_6^*$ ,进而可得  $V_S^D = a_1^* g_{iF} + a_2^* g_{jF} + a_3^*$  和  $V_{M_i}^D = a_4^* g_{iF} + a_5^* g_{jF} + a_6^*$ 。进一步,将  $V_S^D$  和  $V_{M_i}^D$  代入式(22),化简可得  $S_F^D$  和  $Z_{iF}^D$ ,然后根据式(3)计算得到技术创新成功前产品  $i$  的绿色度。

**推论 1** 在分散决策模型中,共享供应商和制造商  $M_i$  在技术创新成功前后的绿色研发投入与技术创新成功概率、绿色度提升率和绿色竞争强度的关系如下:  $\partial S_F^D/\partial\tau > 0$ ,  $\partial Z_{iF}^D/\partial\tau > 0$ ,  $\partial S_L^D/\partial\tau = \partial Z_{iL}^D/\partial\tau = 0$ ;  $\partial S_F^D/\partial\theta > 0$ ,  $\partial Z_{iF}^D/\partial\theta > 0$ ,  $\partial S_L^D/\partial\theta = \partial Z_{iL}^D/\partial\theta = 0$ ;  $\partial^2 S_F^D/(\partial\tau\partial\chi_g) = 0$ ,  $\partial^2 S_F^D/(\partial\theta\partial\chi_g) = 0$ ;  $\partial^2 Z_{iF}^D/(\partial\tau\partial\chi_g) > 0$ ,  $\partial^2 Z_{iF}^D/(\partial\theta\partial\chi_g) > 0$ 。

推论 1 说明,关于绿色技术创新的预测会影响供应链成员在技术创新成功前的绿色研发投入决策。具体来说:①随着技术创新成功概率的提高,供应链成员在技术创新成功前的绿色研发投入增加。其原因是,绿色技术创新的可能性提高了管理者的自信心,改变了管理者的时间偏好,更加注重技术创新成功后所获得的利润。②供应链成员在技术创新成功前的绿色研发投入随着绿色度提升率的提高而增加。原因在于,较高的绿色度提升率使得供应链成员前期的绿色研发投入效率提高,进而提高了供应链成员增加前期绿色研发投入的

积极性。③随着绿色竞争强度增大,绿色技术创新预测对制造商绿色研发投入的影响程度增大。这是因为绿色竞争提高了制造商绿色技术创新的积极性,使其更加关注技术创新成功的概率和绿色度提升率。此外,供应链成员在技术创新成功后的绿色研发投入,不受技术创新成功概率和绿色度提升率的影响。

**推论 2** 在分散决策模型中,共享供应商和制造商  $M_i$  在技术创新成功前后的绿色研发投入与自身边际利润和绿色竞争强度的关系如下: $\partial S_F^{D^*} / \partial \pi_{SF} > 0, \partial S_F^{D^*} / \partial \pi_{SL} > 0, \partial Z_{iF}^{D^*} / \partial \pi_{iF} > 0, \partial Z_{iF}^{D^*} / \partial \pi_{iF} > 0; \partial S_L^{D^*} / \partial \pi_{SF} = 0, \partial S_L^{D^*} / \partial \pi_{SL} > 0, \partial Z_{iF}^{D^*} / \partial \pi_{iF} = 0, \partial Z_{iF}^{D^*} / \partial \pi_{iF} > 0; \partial^2 S_F^{D^*} / (\partial \pi_{SF} \partial \chi_g) = 0, \partial^2 S_F^{D^*} / (\partial \pi_{SL} \partial \chi_g) = 0, \partial^2 Z_{iF}^{D^*} / (\partial \pi_{iF} \partial \chi_g) > 0, \partial^2 Z_{iF}^{D^*} / (\partial \pi_{iF} \partial \chi_g) > 0; \partial^2 S_L^{D^*} / (\partial \pi_{SL} \partial \chi_g) > 0, \partial^2 Z_{iF}^{D^*} / (\partial \pi_{iF} \partial \chi_g) > 0$ 。

由推论 2 可知:①共享供应商和制造商在决策技术创新成功前的绿色研发投入时,需要同时考虑创新成功前后两个阶段的边际利润;而在决策技术创新成功后的绿色研发投入时,只需要考虑当期的边际利润。原因在于,供应链成员是趋利的,只有预测到绿色技术创新能够带来可观的经济利润,才会增加前期的绿色研发投入,这体现了供应链管理者的远见。②随着绿色竞争强度增大,边际利润对制造商绿色研发投入的激励程度增大。这反映了,在绿色产品市场中,可观的边际利润是制造企业进行绿色技术创新的内在动力,而绿色竞争是制造企业进行绿色技术创新的外在助推力。

### 3.2 集中决策模型(C)

在集中决策模型中,共享供应商和两个制造商以绿色供应链整体利润的最大化为目标,共同决策技术创新成功前后两个阶段的绿色研发投入策略。虽然在现实中供应链成员难以实现集成化管理,但是集中决策是供应链协调研究的理论基础,也是分析供应链成员在合作情形下绿色研发投入决策的重要手段,因此研究集中决策仍然具有重要的理论意义。基于此,绿色供应链系统的最优控制问题为

$$\max_{Z_{iF}^C, S_F^C, Z_{iL}^C, S_L^C} J^C = \int_0^\infty e^{-(\rho+\tau)t} \left( \sum_{i=1}^2 (\pi_{iF}(D_0 + \gamma g_{iF} - \chi_g \gamma (g_{iF} - g_{iF})) - h_i Z_{iF}^2 / 2) + \pi_{SF}(2D_0 + \gamma g_{1F} + \gamma g_{2F}) - k S_F^2 / 2 + \tau J_L^C(Z_{1L}, Z_{2L}, S_L) \right) dt \quad (25)$$

**命题 2** 在集中决策模型中,满足  $\Delta \pi_{iF} \geq \Delta \pi_{jF}$  或  $\Delta \pi_{iF} < \Delta \pi_{jF}$  且  $0 < \chi_g < (\Delta \pi_{iF} + \Delta \pi_{SF}) / (\Delta \pi_{jF} - \Delta \pi_{iF})$ , 以及  $\pi_{iF} \geq \pi_{jL}$  或  $\pi_{iF} < \pi_{jL}$  且  $0 < \chi_g < (\pi_{iF} + \pi_{SL}) / (\pi_{jL} - \pi_{iF})$  的条件下,共享供应商和制造商  $M_i$  在技术创新成功前后的最优绿色研发投入分别为

$$S_F^{C^*} = \frac{\gamma \alpha_F (\Delta \pi_{1F} + \Delta \pi_{2F} + 2 \Delta \pi_{SF})}{k(\rho + \tau + \varepsilon_F)(\rho + \varepsilon_L)}; \quad (26)$$

$$S_L^{C^*} = \frac{\gamma \alpha_L (\pi_{1L} + \pi_{2L} + 2 \pi_{SL})}{k(\rho + \varepsilon_L)}; \quad (27)$$

$$Z_{iF}^{C^*} = \frac{\gamma \beta_F (\Delta \pi_{iF} + \Delta \pi_{SF} + \chi_g (\Delta \pi_{iF} - \Delta \pi_{jF}))}{h_i (\rho + \tau + \varepsilon_F)(\rho + \varepsilon_L)}; \quad (28)$$

$$Z_{iF}^{C^*} = \frac{\gamma \beta_L (\pi_{iF} + \pi_{SL} + \chi_g (\pi_{iF} - \pi_{jL}))}{h_i (\rho + \varepsilon_L)}. \quad (29)$$

产品绿色度的动态变化过程为

$$g_{iF}^C(t) = \begin{cases} (g_0 - \bar{g}_{iF}^C) e^{-Ft} + \bar{g}_{iF}^C, & t \in [0, T]; \\ (((g_0 - \bar{g}_{iF}^C) e^{-Ft} + \bar{g}_{iF}^C) (1 + \theta) - \bar{g}_{iL}^C) \cdot e^{-L(t-T)} + \bar{g}_{iL}^C, & t \in [T, \infty), \end{cases} \quad (30)$$

式中,  $\bar{g}_{iF}^C = \gamma \alpha_F^2 (\Delta \pi_{iF} + \Delta \pi_{jF} + 2 \Delta \pi_{SF}) / (k \varepsilon_F (\rho + \tau + \varepsilon_F)(\rho + \varepsilon_L)) + \gamma \beta_F^2 (\Delta \pi_{iF} + \Delta \pi_{SF} + \chi_g (\Delta \pi_{iF} - \Delta \pi_{jF})) / (h_i \varepsilon_F (\rho + \tau + \varepsilon_F)(\rho + \varepsilon_L))$  和  $\bar{g}_{iL}^C = \gamma \alpha_L^2 \cdot (\pi_{iF} + \pi_{jL} + 2 \pi_{SL}) / (k \varepsilon_L (\rho + \varepsilon_L)) + \gamma \beta_L^2 (\pi_{iF} + \pi_{SL} + \chi_g (\pi_{iF} - \pi_{jL})) / (h_i \varepsilon_L (\rho + \varepsilon_L))$  分别表示在集中决策模型中,技术创新成功前后两个阶段的产品绿色度稳态值。

绿色供应链系统在整个运营期间期望利润的最优价值函数为  $V^C = b_1^* g_{1F}^C + b_2^* g_{2F}^C + b_3^*$ 。其中,  $b_1^* = \gamma (\Delta \pi_{1F} + \Delta \pi_{SF} + \chi_g (\Delta \pi_{1F} - \Delta \pi_{2F})) / ((\rho + \tau + \varepsilon_F)(\rho + \varepsilon_L))$ ,  $b_2^* = \gamma (\Delta \pi_{2F} + \Delta \pi_{SF} + \chi_g (\Delta \pi_{2F} - \Delta \pi_{1F})) / ((\rho + \tau + \varepsilon_F)(\rho + \varepsilon_L))$ ,  $b_3^* = (2D_0 \rho (\pi_{1F} + \pi_{2F} + 2 \pi_{SF}) + \tau B_1) / (2\rho(\rho + \tau)) + (2D_0 \tau (\pi_{1L} + \pi_{2L} + 2 \pi_{SL}) + \rho B_2) / (2\rho(\rho + \tau))$ ,  $B_1 = \gamma^2 \alpha_L^2 (\pi_{1L} + \pi_{2L} + 2 \pi_{SL})^2 / (k(\rho + \tau + \varepsilon_L)^2) + \sum_{i=1}^2 \gamma^2 \beta_L^2 (\pi_{iF} + \pi_{SL} + \chi_g (\pi_{iF} - \pi_{jL}))^2 / (h_i (\rho + \varepsilon_L)^2)$ ,  $B_2 = \gamma^2 \alpha_F^2 (\Delta \pi_{1F} + \Delta \pi_{2F} + 2 \Delta \pi_{SF})^2 / (k(\rho + \tau + \varepsilon_F)^2) + \sum_{i=1}^2 \gamma^2 \beta_F^2 (\Delta \pi_{iF} + \Delta \pi_{SF} + \chi_g (\Delta \pi_{iF} - \Delta \pi_{jF}))^2 / (h_i (\rho + \tau + \varepsilon_F)^2 (\rho + \varepsilon_L)^2)$ 。

**推论 3** 在集中决策模型中,共享供应商和制造商  $M_i$  在技术创新成功前后的最优绿色研发投入与技术创新成功概率和绿色度提升率的关系如下: $\partial S_F^{C^*} / \partial \tau > 0, \partial Z_{if}^{C^*} / \partial \tau > 0, \partial S_L^{C^*} / \partial \tau = \partial Z_{if}^{C^*} / \partial \tau = 0; \partial S_F^{C^*} / \partial \theta > 0, \partial Z_{if}^{C^*} / \partial \theta > 0, \partial S_L^{C^*} / \partial \theta = \partial Z_{if}^{C^*} / \partial \theta = 0; \partial^2 S_F^{C^*} / (\partial \tau \partial \chi_g) = 0$ ; 当  $(\pi_{if} - \pi_{jl}) / (\pi_{if} - \pi_{jf}) \geq (\rho + \varepsilon_L) / ((1 + \theta)(\rho + \varepsilon_F))$  时,  $\partial^2 Z_{if}^{C^*} / (\partial \tau \partial \chi_g) > 0$ , 反之当  $(\pi_{if} - \pi_{jl}) / (\pi_{if} - \pi_{jf}) < (\rho + \varepsilon_L) / ((1 + \theta)(\rho + \varepsilon_F))$  时,  $\partial^2 Z_{if}^{C^*} / (\partial \tau \partial \chi_g) < 0$ ;  $\partial^2 S_F^{C^*} / (\partial \theta \partial \chi_g) = 0$ ; 当  $\pi_{if} \geq \pi_{jl}$  时,  $\partial^2 Z_{if}^{C^*} / (\partial \theta \partial \chi_g) > 0$ , 反之当  $\pi_{if} < \pi_{jl}$  时,  $\partial^2 Z_{if}^{C^*} / (\partial \theta \partial \chi_g) < 0$ 。

对比推论 1 和推论 3 可以发现:①集中决策与分散决策相同的是,随着技术创新成功概率和绿色度提升率的提高,共享供应商和制造商在技术创新成功前的绿色研发投入增加,而技术创新成功后的绿色研发投入不变。②不同的是,集中决策下,绿色技术创新预测对制造商绿色研发投入的影响程度与绿色竞争强度有关。具体来说,绿色竞争强度越大,随着技术创新成功概率和绿色度提升率的提高,边际利润较大的制造商愈加增加绿色研发投入,而边际利润较小的制造商会减少绿色研发的投入。其原因在于,边际利润越大,绿色研发投入的效率越高,而集中决策是以绿色供应链整体利润的最大化为目标,因此供应链管理者会让边际利润较大的制造商承担更多的绿色研发投入,让边际利润较小的制造商承担较少的绿色研发投入,从而实现绿色研发投入资源的协调分配。

### 3.3 两种决策对比分析

本节将进一步比较集中和分散决策模型下供应链成员的绿色研发投入、产品绿色度和绿色供应链系统利润,得出推论 4 ~ 推论 6。

**推论 4** 对比两种决策模型下共享供应商和制造商  $M_i$  的最优绿色研发投入可得: $S_F^{C^*} > S_F^{D^*}, S_L^{C^*} > S_L^{D^*}$ ; 当  $\Delta \pi_{sf} \geq \Delta \pi_{jf}$  或  $\Delta \pi_{sf} < \Delta \pi_{jf}$  且  $0 < \chi_g \leq \Delta \pi_{sf} / \Delta \pi_{jf}$  时,  $Z_{if}^{C^*} \geq Z_{if}^{D^*}$ ; 当  $\pi_{sl} \geq \pi_{jl}$  或  $\pi_{sl} < \pi_{jl}$  且  $0 < \chi_g \leq \pi_{sl} / \pi_{jl}$  时,  $Z_{if}^{C^*} \geq Z_{if}^{D^*}$ 。

推论 4 说明,共享供应商在集中决策情形下的绿色研发投入大于分散决策情形下的绿色研发投入;对于制造商而言,当共享供应商的边际利润大于制造商的边际利润,或共享供应商的边际利润小于制造商的边际利润且绿色竞争强度满足特定阈值时,制造商在集中决策模型下的绿色研发投入更多。这表明集中决策能够激励共享供应商增加绿色研发投入;而对制造商绿色研发投入的激励,与供应链成员的边际利润和绿色竞争强度有关。结合推论 3,其原因在于,集中决策能够消除绿色供应链的双重边际效应,更加合理配置制造商之间的绿色研发投入资源,进而提高供应链效率。

**推论 5** 对比两种决策模型下的稳态产品绿色度可得:当  $\Delta \pi_{sf} \geq \Delta \pi_{jf}$  或  $\Delta \pi_{sf} < \Delta \pi_{jf}$  且  $0 < \chi_g \leq h_i \alpha_F^2 (\Delta \pi_{if} + \Delta \pi_{jf}) / (k \beta_i^2 \Delta \pi_{jf}) + \Delta \pi_{sf} / \Delta \pi_{jf}$  时,  $\bar{g}_{if}^C \geq \bar{g}_{if}^D$ ; 当  $\pi_{sl} \geq \pi_{jl}$  或  $\pi_{sl} < \pi_{jl}$  且  $0 < \chi_g \leq h_i \alpha_L^2 (\pi_{if} + \pi_{jl}) / (k \beta_L^2 \pi_{jl}) + \pi_{sl} / \pi_{jl}$  时,  $\bar{g}_{il}^C \geq \bar{g}_{il}^D$ 。

根据推论 5 分析可得,当共享供应商的边际利润高于制造商的边际利润,或共享供应商的边际利润小于制造商的边际利润且绿色竞争强度满足特定阈值时,集中决策下的产品绿色度优于分散决策下的产品绿色度。结合推论 3 和推论 4,这是由于在集中决策下,共享供应商增加了绿色研发投入,边际利润较大的制造商承担更多的绿色研发投入,边际利润较小的制造商承担更少的绿色研发投入。即从整个供应链来看,绿色研发投入资源分配得更加合理,也投入得更多,进而使得产品绿色度提高。

**推论 6** 满足  $\Delta \pi_{sf} \geq \Delta \pi_{jf}$  或  $\Delta \pi_{sf} < \Delta \pi_{jf}$  且  $0 < \chi_g \leq h_i \alpha_F^2 (\Delta \pi_{if} + \Delta \pi_{jf}) / (k \beta_F^2 \Delta \pi_{if}) + \Delta \pi_{sf} / \Delta \pi_{if}$  条件时,  $V^C > V^D$ 。

由推论 6 可知,当共享供应商的边际利润大于制造商的边际利润,或共享供应商的边际利润小于制造商的边际利润且绿色竞争强度满足特定阈值时,集中决策下的绿色供应链的期望利润大于分散决策下的绿色供应链的期望利润,此时共享供应商和两个制造商从经济发展视角来看应该选择合作。结合推论 5,这是因为,在该条件下集中决策的产品绿色度高于分散决策的产品绿色度。产品绿色度提高能够增加市场需求量,进而使得在边际利润不变的情况下集中决策能够获得更多的经济效益。

### 4 双向成本分担契约 (CS)

根据推论 5 和推论 6,集中决策在一定条件下能够使绿色供应链取得更高的产品绿色度和期望利润。众所周知,在实际生产运营过程中,企业通常都是独立个体,并以自身利润最大化为目标,难以实现集中决策。但是,在绿色转型发展背景下,实现供应链的绿色转型需要供应链内上下游企业的通力合作,共同攻克绿色技术难题,那么如何促成供应链成员合作进而达到集中决策的效果是具有研究意义的。为此,本研究设计了双

向成本分担契约来实现供应链协调,即在技术创新成功前后两个阶段,共享供应商分担制造商  $M_i$  一定比例  $\phi_{iF}$ 、 $\phi_{iL}$  的绿色研发投入成本,与此同时制造商  $M_i$  分担共享供应商一定比例  $\lambda_{iF}$ 、 $\lambda_{iL}$  的绿色研发投入成本。因此,在双向成本分担契约中,共享供应商和制造商  $M_i$  的最优控制问题分别为

$$\max_{S_i, \lambda_{iF}, \lambda_{iL}, \phi_{iF}, \phi_{iL}} J_S^{CS} = \int_0^\infty e^{-(\rho+\tau)t} (\pi_{SF}(2D_0 + \gamma g_{1F} + \gamma g_{2F}) - (1 - \lambda_{1F} - \lambda_{2F}) k S_F^2 / 2 - \phi_{1F} h_1 Z_{1F}^2 / 2 - \phi_{2F} h_2 Z_{2F}^2 / 2 + \tau J_{SL}^{CS}(S_L, \phi_{iL})) dt; \quad (31)$$

$$\max_{Z_i, \lambda_{iF}, \lambda_{iL}} J_{M_i}^{CS} = \int_0^\infty e^{-(\rho+\tau)t} (\pi_{iF}(D_0 + \gamma g_{iF} - \chi_g \gamma (g_{jF} - g_{iF})) - (1 - \phi_{iF}) h_i Z_{iF}^2 / 2 - \lambda_{iF} k S_F^2 / 2 + \tau J_{ML}^{CS}(Z_{iF}, \lambda_{iF})) dt. \quad (32)$$

**命题3** 在双向成本分担契约中,当共享供应商分担制造商绿色研发投入成本比例  $\phi_{iF}$ 、 $\phi_{iL}$  和制造商分担共享供应商绿色研发投入成本比例  $\lambda_{iF}$ 、 $\lambda_{iL}$  固定时,共享供应商和制造商  $M_i$  的绿色研发投入满足以下条件:

$$S_F^{CS} = \frac{2\gamma\alpha_F\pi_{SF}}{k(\rho+\tau+\varepsilon_F)(\rho+\varepsilon_L)(1-\lambda_{1F}-\lambda_{2F})}; \quad (33)$$

$$S_L^{CS} = \frac{2\gamma\alpha_L\pi_{SL}}{k(\rho+\varepsilon_L)(1-\lambda_{1L}-\lambda_{2L})}; \quad (34)$$

$$Z_{iF}^{CS} = \frac{\gamma\beta_F(1+\chi_g)\Delta\pi_{iF}}{h_i(\rho+\tau+\varepsilon_F)(\rho+\varepsilon_L)(1-\phi_{iF})}; \quad (35)$$

$$Z_{iF}^{CS} = \frac{\gamma\beta_L(1+\chi_g)\pi_{iF}}{h_i(\rho+\varepsilon_L)(1-\phi_{iL})}. \quad (36)$$

进一步联立方程组  $S_F^{CS} = S_F^{C^*}$ ,  $S_L^{CS} = S_L^{C^*}$ ,  $Z_{iF}^{CS} = Z_{iF}^{C^*}$  和  $Z_{iF}^{CS} = Z_{iF}^{C^*}$ , 求解可得如下命题。

**命题4** 在  $\chi_g < \Delta\pi_{SF} / \Delta\pi_{jF}$  且  $\chi_g < \pi_{SL} / \pi_{jL}$  的前提下,当共享供应商分担制造商绿色研发投入成本比例  $\phi_{iF}$ 、 $\phi_{iL}$  和制造商分担共享供应商绿色研发投入成本比例  $\lambda_{iF}$ 、 $\lambda_{iL}$  满足以下条件时,双向成本分担契约可以完全协调绿色供应链:

$$\phi_{iF} = \frac{\Delta\pi_{SF} - \chi_g \Delta\pi_{jF}}{\Delta\pi_{iF} + \Delta\pi_{jF} + \chi_g (\Delta\pi_{iF} - \Delta\pi_{jF})}; \quad (37)$$

$$\phi_{iF} = \frac{\pi_{SL} - \chi_g \pi_{jL}}{\pi_{iF} + \pi_{jL} + \chi_g (\pi_{iF} - \pi_{jL})}; \quad (38)$$

$$\lambda_{1F} + \lambda_{2F} = \frac{\Delta\pi_{1F} + \Delta\pi_{2F}}{\Delta\pi_{1F} + \Delta\pi_{2F} + \Delta\pi_{SF}}; \quad (39)$$

$$\lambda_{1L} + \lambda_{2L} = \frac{\pi_{1L} + \pi_{2L}}{\pi_{1L} + \pi_{2L} + \pi_{SL}}. \quad (40)$$

命题4说明,当共享供应商的边际利润大于制造商的边际利润,或共享供应商的边际利润小于制造商的边际利润且绿色竞争强度满足特定阈值时,双向成本分担契约能够达到集中决策的效果。其中,在技术创新成功前后两个阶段,两个制造商为共享供应商分担绿色研发投入成本的比例之和分别为  $(\Delta\pi_{1F} + \Delta\pi_{2F}) / (\Delta\pi_{1F} + \Delta\pi_{2F} + \Delta\pi_{SF})$  和  $(\pi_{1L} + \pi_{2L}) / (\pi_{1L} + \pi_{2L} + \pi_{SL})$ , 即两个制造商为共享供应商分担的绿色研发投入成本之和是确定的,与绿色竞争强度无关。这表明,在制定双向成本分担契约之前,两个制造商首先要形成联盟,以制造商联盟的形式对共享供应商提供绿色研发支持。

由于制造商联盟达成后通常在一段时间内保持不变,所以本研究假定两个制造商对共享供应商进行绿色研发支持所需成本的分配比例为常数。具体来说,两个制造商共同决策制造商  $M_i$  在技术创新成功前后分担对共享供应商进行绿色研发支持所需成本的比例分别为  $\xi_F$  和  $\xi_L$ , 那么制造商  $M_2$  分担所需成本的比例分别为  $1 - \xi_F$  和  $1 - \xi_L$ 。由此可得,  $\lambda_{1F} = \xi_F(\lambda_{1F} + \lambda_{2F})$ ,  $\lambda_{2F} = (1 - \xi_F)(\lambda_{1F} + \lambda_{2F})$ ,  $\lambda_{1L} = \xi_L(\lambda_{1L} + \lambda_{2L})$  和  $\lambda_{2L} = (1 - \xi_L)(\lambda_{1L} + \lambda_{2L})$ 。进一步,为了保证供应链成员均能够接受该契约,就需要保证契约下所有供应链成员的期望利润均不小于分散决策下的期望利润。共享供应商和制造商联盟接受双向成本分担契约的条件是:存在  $\xi_F$  和  $\xi_L$ , 使得  $V_S^{CS} \geq V_S^D$  且  $V_{M_i}^{CS} \geq V_{M_i}^D$  成立。本研究在数值算例部分将继续分析  $\xi_F$  和  $\xi_L$  对双向成本分担契约协调效果的影响。

**推论7** 在双向成本分担契约中,共享供应商对两个制造商绿色研发投入成本的分担比例与制造商之间的绿色竞争强度负相关,与自身边际利润正相关;两个制造商对共享供应商绿色研发投入成本的分担比例之

和与绿色竞争强度无关,与二者边际利润正相关。

推论7表明,共享供应商和制造商可获得的边际利润越高,越倾向于为对方承担部分绿色研发投入成本,即越有利于供应链成员达成双向成本分担契约。然而,制造商之间的绿色竞争强度增加会减弱共享供应商为二者承担部分绿色研发投入成本的意愿。结合推论1,其原因在于当绿色竞争强度较大时,制造商会自发地增加绿色研发投入,此时共享供应商就可以适当减少对制造商的绿色研发投入激励。

## 5 数值算例

本节将通过数值算例,分析技术创新成功概率和绿色度提升率对绿色研发投入、产品绿色度和供应链利润的影响,以及验证双向成本分担契约的有效性。相关参数假定如下: $\alpha_F=0.8, \beta_F=0.6, \alpha_L=1, \beta_L=0.8, \varepsilon_F=0.3, \varepsilon_L=0.2, \rho=0.3, \pi_{SF}=1.5, \pi_{IF}=2.5, \pi_{2F}=3, \pi_{SL}=2.5, \pi_{IL}=4, \pi_{2L}=5, k=2, h_1=2, h_2=2, D_0=20, \gamma=1, g_0=0, \tau \in (0,1), \theta \in (0,1), \chi_g \in (0,1)$ 。为了能够形象直观地展现绿色技术创新对产品绿色度和绿色供应链利润的影响,选取低技术成功概率-低绿色度提升率( $\tau=0.2, \theta=0.2$ )、高技术成功概率-低绿色度提升率( $\tau=0.8, \theta=0.2$ )、低技术成功概率-高绿色度提升率( $\tau=0.2, \theta=0.8$ )、高技术成功概率-高绿色度提升率( $\tau=0.8, \theta=0.8$ ),即低-低、高-低、低-高、高-高4种技术创新情况进行对比分析。

### 5.1 绿色技术创新对绿色研发投入的影响

绿色技术创新对共享供应商和制造商  $M_1$  的绿色研发投入的影响见图2。由图2(a)和(b)可知,随着技术创新成功概率的提高,共享供应商和制造商  $M_1$  在技术创新成功前的绿色研发投入增加,但增速逐步放缓,在技术创新成功后的绿色研发投入不变。由图2(c)和(d)可知,随着绿色度提升率的增加,共享供应商和制造商  $M_1$  在技术创新成功前的绿色研发投入稳步增加,而在技术创新成功后的绿色研发投入不变。此外,与分散决策相比,共享供应商和制造商  $M_1$  在集中决策下的绿色研发投入更高。

### 5.2 绿色技术创新对产品绿色度的影响

4种技术创新情况下产品绿色度的时间变化轨迹见图3。由图3可知,在技术创新成功前后两个阶段,产品绿色度均随着时间增长趋于稳定,但技术创新成功后产品绿色度的稳态值远大于技术创新成功前产品绿色度的稳态值;较高的技术创新概率和绿色度提升率,可以提高技术创新成功前以及技术创新成功后一段时间内的产品绿色度,但并不会影响技术创新成功后产品绿色度的稳态值。这是因为当预测的技术创新成功概率和绿色度提升率较高时,供应链成员会加大绿色研发投入,进而提高技术创新过程中的产品绿色度,但技术创新成功后,产品绿色度的稳态值与技术创新成功概率和绿色度提升率的预测无关。集中决策下的产品绿色度高于分散决策下的产品绿色度,尤其在技术创新成功后,二者的差距明显拉大。因此从提高产品绿色度方面来看,集中决策优于分散决策。此外,同一技术创新情况下,边际利润较大的制造商  $M_2$  生产的产品绿色度高于边际利润较小的制造商  $M_1$  生产的产品绿色度。这表明技术创新相同的情况下,提高企业的边际利润有利于企业提高产品绿色度。

### 5.3 绿色技术创新对供应链利润的影响

4种技术创新情况下绿色供应链利润的时间变化轨迹见图4。由图4可知,在技术创新成功前后两个阶段,绿色供应链利润均随着时间逐渐增加,直至达到稳定状态,但技术创新成功后的利润远远高于技术创新成功前的利润,实现了利润的翻倍增长。这表明,绿色技术创新是绿色时代下制造企业增加经济利润、实现弯道超车的根本途径。并且,随着技术创新成功概率和绿色度提升率的增大,供应链成员在整个运营期间的利润能够得到增加。这是因为较高的技术创新成功概率和绿色度提升率,能够激励供应链成员在技术创新成功前增加绿色研发投入。此外,绿色供应链在集中决策下的利润远高于分散决策下的利润,尤其在技术创新成功后。由此,从提高绿色供应链利润方面来看,集中决策优于分散决策。

### 5.4 双向成本分担契约协调效果

下面对比分析在技术创新成功前后,共享供应商和两个制造商在双向成本分担契约和分散决策两种情形下利润的差值,即双向成本分担契约的协调效果(见图5)。由图5可知,在技术创新成功前后均存在  $\xi_F$  和  $\xi_L$ ,使得  $V_M^{CS} - V_M^D > 0$  和  $V_S^{CS} - V_S^D > 0, W_M^{CS} - W_M^D > 0$  和  $W_S^{CS} - W_S^D > 0$ 。这表明,共享供应商和两个制造商均能接受双向成本分担契约,并且该契约在技术创新成功前后均能协调绿色供应链。因此,绿色技术创新并不会改变双向成本分担契约对绿色供应链的协调性。技术创新成功前的协调效果受  $\xi_F$  和  $\xi_L$  的共同影响,而技术创新成功后的

协调效果仅受  $\xi_L$  的影响,这意味着在技术创新成功前,两个制造商就要协商好  $\xi_F$  和  $\xi_L$ 。而且,通过调节  $\xi_F$  和  $\xi_L$  可以协调两个制造商获得的利润差值。

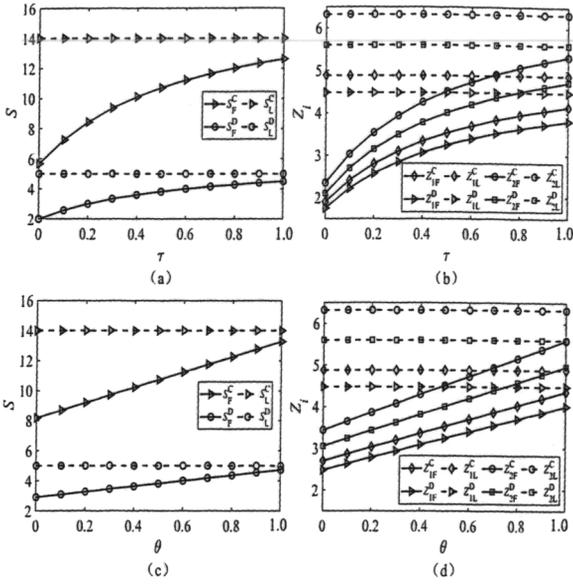


图2 绿色技术创新对绿色研发投入的影响

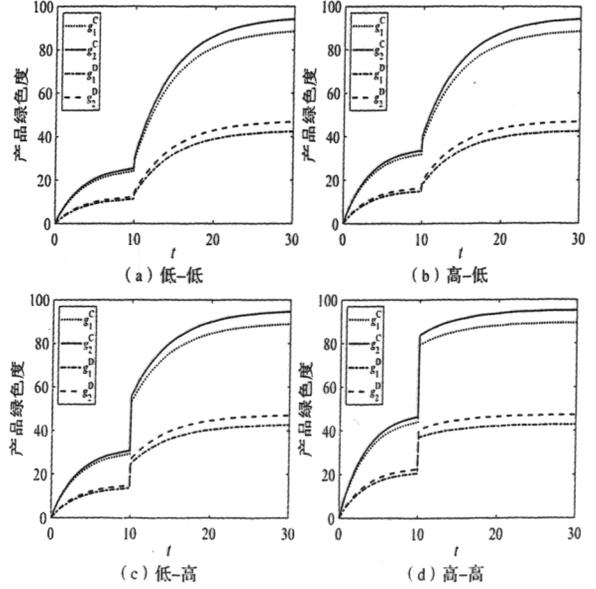


图3 绿色技术创新对产品绿色度的影响

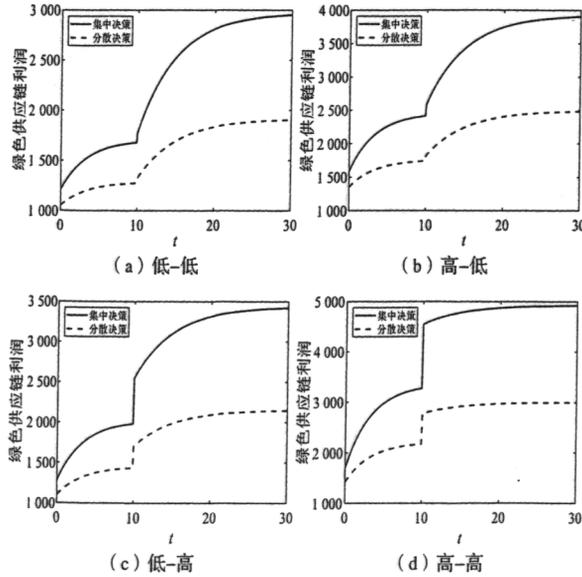


图4 绿色技术创新对供应链利润的影响

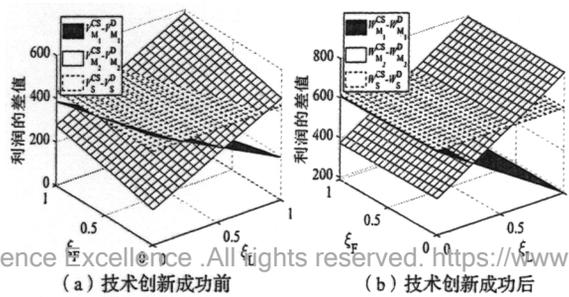


图5 双向成本分担契约的协调效果

## 6 结语

本研究以单个共享供应商和两个制造商组成的绿色供应链为研究对象,引入绿色技术创新过程,基于微分博弈探究分散、集中两种决策模型下供应链成员的绿色研发投入,并进行对比分析,设计了双向成本分担契约以协调供应链,以及通过数值算例探讨绿色技术创新对绿色研发投入、产品绿色度和供应链利润的影响,验证了双向成本分担契约的协调效果。研究发现:①绿色技术创新的预测会影响供应链成员技术创新成功前的绿色研发投入决策,进而影响产品绿色度和供应链利润。具体而言,技术创新成功前的绿色研发投入、产品绿色度和供应链利润随着技术创新成功概率和绿色度提升率的提高而增加。②供应链成员决策技术创新成功前的绿色研发投入时,会同时考虑技术创新成功前后的边际利润,这体现了决策者的远见。③绿色技术创新对制造商绿色研发投入的影响程度与绿色竞争强度有关。具体来说,在分散决策模型下,绿色技术创新对制造商绿色研发投入的影响,随着绿色竞争强度的增大而增加;在集中决策模型下,随着绿色竞争强度增大,绿色技术创新对边际利润较大的制造商绿色研发投入的影响增加,对边际利润较小的制造商绿色研发投入的影响减小。④在一定条件下,集中决策优于分散决策,并且双向成本分担契约在技术创新成功前后均能够实现绿色供应链协调,即绿色技术创新并不改变双向成本分担契约的协调性。⑤在双向成本分担契约中,共享供应商对制造商绿色研发投入成本的分担比例与绿色竞争强度负相关,而两个制造商对共享供应商绿色研发投入成本的分担比例之和是确定的,与绿色竞争强度无关。

本研究的管理启示为:①对于共享供应商而言,应积极与下游制造商进行合作,共同投资、研发关键技术,实现绿色技术创新;②对于制造商而言,应当在保持有序的良好竞争的同时,积极开展横向、纵向合作,助力供应商在关键零部件方面实现绿色技术创新;③绿色技术创新是企业绿色转型的根本途径,有效评估技术创新成功概率和绿色度提升率,对于企业合理配置技术创新成功前后的绿色研发投入资源具有重要意义。

本研究尚存在一些不足,可以进行拓展的方向有:①仅考虑了绿色竞争,未来研究可以进一步引入价格竞争和广告竞争;②将制造商联盟内的分配比例视为了常数,未来研究可以通过制造商联盟内的博弈来确定分配比例。

### 注释:

- ①资料来源于 <http://www.itdcw.com/news/focus/061a91352017.html>。
- ②资料来源于 [https://www.sohu.com/a/243027061\\_467089](https://www.sohu.com/a/243027061_467089)。
- ③资料来源于 [https://www.guancha.cn/qiche/2019\\_12\\_24\\_529344.shtml](https://www.guancha.cn/qiche/2019_12_24_529344.shtml)。

### 参考文献:

- [1] LI K, LIN B Q. Economic growth model, structural transformation, and green productivity in China[J]. Applied Energy, 2017, 187: 489-500.
- [2] 汪明月, 李颖明, 管开轩. 政府市场规制对企业绿色技术创新决策与绩效的影响[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(5): 1158-1177.
- [3] 张玉明, 邢超, 张瑜. 媒体关注对重污染企业绿色技术创新的影响研究[J]. 管理学报, 2021, 18(4): 557-568.
- [4] 汪明月, 李颖明, 王子彤. 技术和市场双重不确定性下企业绿色技术创新及绩效[J]. 系统管理学报, 2021, 30(2): 353-362.
- [5] WANG Y M, XIAO Y X, YANG N. Improving reliability of a shared supplier with competition and spillovers[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 236(2): 499-510.
- [6] 王震坡, 黎小慧, 孙逢春. 产业融合背景下的新能源汽车技术发展趋势[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(1): 1-10.
- [7] 蒋军锋, 李孝兵, 殷婷婷, 等. 突破性技术创新的形成: 述评与未来研究[J]. 研究与发展管理, 2017, 29(6): 109-120.
- [8] HAJHASHM M, KHORASANI A. Demystifying the dynamic of disruptive innovations in markets with complex adoption networks: from encroachment to disruption[J]. International Journal of Innovation and Technology Management, 2015, 12(5): 155-224.
- [9] 郭凌军, 刘嫣然, 刘光富. 环境规制、绿色创新与环境污染关系实证研究[J]. 管理学报, 2022, 19(6): 892-900, 927.
- [10] MOHR J J, SARIN S. Drucker's insights on market orientation and innovation: implications for emerging areas in high-technology marketing[J]. Journal of the Academy of Marketing Science, 2009, 37(1): 85-96. <https://www.rdfyb.com/>
- [11] 庄芹芹, 吴滨, 洪群联. 市场导向的绿色技术创新体系: 理论内涵、实践探索与推进策略[J]. 经济学家, 2020(11): 29-38.
- [12] ZHANG Q, MA Y. The impact of environmental management of firm economic performance: the mediating effect of green innova-

- tion and the moderating effect of environmental leadership[J]. *Journal of Cleaner Production*,2021,292:126057.
- [13]HOJNIK J,RUZZIER M. The driving of process eco-innovation and its impact on performance:insights from Slovenia[J]. *Journal of Cleaner Production*,2016,133:812-825.
- [14]侯建,宋洪峰,李丽. 非研发投入、知识积累与中国制造业绿色创新增长[J]. *系统管理学报*,2019,28(1):67-76,85.
- [15]曹裕,李青松,胡韩莉. 不同政府补贴策略对供应链绿色决策的影响研究[J]. *管理学报*,2019,16(2):297-305,316.
- [16]LI B,CHEN W C,XU C C,et al. Impacts of government subsidies for environmental-friendly products in a dual-channel supply chain[J]. *Journal of Cleaner Production*,2018,171:1558-1576.
- [17]江世英,李随成. 考虑产品绿色度的绿色供应链博弈模型[J]. *中国管理科学*,2015,23(6):169-176.
- [18]XU X P,HE P,XU H,et al. Supply chain coordination with green technology under cap-trade regulation[J]. *International Journal of Production Economics*,2017,183:433-442.
- [19]周艳菊,胡凤英,周正龙. 零售商主导下促进绿色产品需求的联合研发契约协调研究[J]. *管理工程学报*,2020,34(2):194-204.
- [20]WANG L M,SONG Q K. Pricing policies for dualchannel supply chain with green investment and sales effort under uncertain demand[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*,2020,171:79-93.
- [21]MA P,ZHANG C,HONG X P,et al. Pricing decisions for substitutable products with green manufacturing in a competitive supply chain[J]. *Journal of Cleaner Production*,2018,183:618-640.
- [22]李思凝,陈凯. 竞争环境下新能源汽车嵌入技术服务的定价策略[J]. *系统管理学报*,2020,29(3):561-572.
- [23]LIU Z G,ANDERSON T D,CRUZ J M. Consumer environmental awareness and competition in twostage supply chains[J]. *European Journal of Operational Research*,2012,218(3):602-613.
- [24]许格妮,陈惠汝,武晓莉,等. 竞争供应链中绿色成本分担博弈分析[J]. *系统工程学报*,2020,35(2):244-256.
- [25]WEI J Y,WANG C X. Improving interaction mechanism of carbon reduction technology innovation between supply chain enterprises and government by means of differential game[J]. *Journal of Cleaner Production*,2021,296:126578.
- [26]游达明,朱桂菊. 低碳供应链生态研发、合作促销与定价的微分博弈分析[J]. *控制与决策*,2016,31(6):1047-1056.
- [27]关志民,曲优,赵莹. 考虑决策者失望规避的供应链协同绿色创新动态优化与协调研究[J]. *运筹与管理*,2020,29(5):96-107.
- [28]朱桂菊,游达明. 基于微分对策的绿色供应链生态研发策略与协调机制[J]. *运筹与管理*,2017,26(6):62-69.
- [29]LIU G W,YANG H F,DAI R. Which contract is more effective in improving product greenness under different power structures: revenue sharing or cost sharing? [J]. *Computers & Industrial Engineering*,2020,148:106701.
- [30]胡劲松,刘玉红,马德青. 技术创新下考虑绿色度和溯源商誉的食品供应链动态策略[J]. *软科学*,2021,35(1):39-49.

## Differential Game Study of Green Supply Chain Based on Green Technology Innovation and Manufacturer Competition

Liu Li Han Tongyin Jin Hao

**Abstract:** By introducing the innovation process of green technology, this study constructs a green supply chain composed of a single shared supplier and two manufacturers, and uses a stochastic stopping model to describe the impact of green technology innovation on green R&D investment decisions. Based on the differential game, the green R&D investment decisions and coordination of supply chain are researched. The results show that: a higher probability of success of technological innovation and a higher rate of greenness improvement can motivate enterprises to increase green R&D investment before successful technological innovation, and then improve product greenness. The impact of green technology innovation on manufacturers' green R&D investment is related to the intensity of green competition. The bidirectional cost-sharing contract can coordinate the supply chain, in which the share ratio of the shared supplier to the manufacturers' green R&D input cost is negatively correlated with the intensity of green competition, and the sum of the share ratio of the two manufacturers to the shared supplier's green R&D input cost is determined.

**Key words:** green technology innovation; manufacturer competition; green supply chain; differential game