

不同主导模式下工业共生链的定价决策研究

施可可, 李芳, 王东阳, 周兆思

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 工业共生链管理是提高不同链之间经济效益与环境可持续发展的有效手段。为研究不同主导模式下工业共生链中各企业的定价问题, 建立一个由废弃物供应商和产品制造商组成的两级工业共生链模型, 采用博弈论分析方法求得不同主导模式下废弃物供应商和产品制造商的最优定价和利润模型, 在此基础上进一步分析了共生程度、废弃物利用率、单位利润值对工业共生链中各方收益的影响。研究发现: 不同权利结构会导致各利益主体的最优价格和最大利润不同, 当制造商处于主导地位时工业共生链总收益高于供应商主导; 随着共生程度和废弃物利用率的增加, 工业共生链中制造商和供应商均可获得更多的利润。最后, 通过算例分析, 验证了结论的有效性。

关键词: 工业共生链; 共生程度; 废弃物可利用率; Stackelberg 博弈

中图分类号: F 274 **文献标志码:** A

A study of decision making in industrial symbiosis chain dominated by different rights

SHI Keke, LI Fang, WANG Dongyang, ZHOU Zhaosi

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Industrial symbiosis chain management is an effective means of improving economic efficiency and environmental sustainability between different chains. A two-level industrial symbiosis chain model consisting of a single supplier and a single manufacturer was developed. The Stackelberg game was used to analyze the optimal pricing and profit model for each participant under different rights dominant models of suppliers and manufacturers. The impact of the degree of symbiosis, waste utilization and unit profit value on the revenue of the industrial symbiosis chain was also analyzed. Results show that different rights dominance leads to different optimal prices and maximum profits for each player. Suppliers and manufacturers are in the lead in price and revenue decisions regardless of who dominates. The total revenue of the industrial symbiosis chain is higher when the manufacturer is dominant than when the supplier is dominant. As the degree of symbiosis and waste utilization increases, the symbiotic firms can earn more profits. The validity of the conclusions is finally verified by the analysis of arithmetic examples.

收稿日期: 2022-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71840003); 上海市软科学研究重点项目(19692104000)

第一作者: 施可可(1997-), 女, 硕士研究生。研究方向: 供应链管理、云制造。E-mail: shikeke13613978727@163.com

通信作者: 李芳(1966-), 女, 副教授。研究方向: 供应链管理、云制造。E-mail: lifang2502@126.com

Keywords: industrial symbiotic chains; symbiosis degree; waste availability; Stackelberg games

随着工业 4.0 时代的到来和《中国制造 2025》的推进,人口、资源和环境之间的矛盾日益加剧^[1]。据统计,截至 2020 年全球工业产生的废弃物总量已经达到 20 亿 t,且废弃物产量仍然在快速增长。大量废弃物能否得到有效利用成为焦点问题,在此背景下工业共生链应运而生。工业共生链是指一条链的供应商产生的废弃物经过微处理后交易给另一条链中的制造商,并成为该制造商生产的原材料。它的作用是减少企业的废弃物对环境的过度污染和资源的严重浪费^[2],同时降低了制造商的生产成本,提高了参与方的利润^[3]。钢铁工业是典型的资源能源密集型工业,产生大量固体废弃物。据统计,每年钢铁工业固体废物产生量达 5.0 亿 t。随着我国提出“十三五”规划以来,伴随着生铁、粗钢产量增长,高炉渣、钢渣等大宗工业固废也呈增长态势。据测算,全国高炉渣由 2015 年的 2.51 亿 t 增长至 2018 年的 2.70 亿 t,年均增长 3.7%;钢渣由 2015 年的 1.04 亿 t 增长至 2018 年的 1.14 亿 t,年均增长 4.7%。钢铁渣等固废多以外卖利用和建材化利用为主^[4]。然而,现阶段由于缺乏科学合理的定价策略,导致企业之间废弃物再生利用难度大、效率低。因此,目前急需建立了一个合理的废弃物交易价格机制,提高供应商对废弃物再利用的积极性,实现资源节约的“双赢”目标^[5]。

工业共生链作为实现废弃物资源化的有效途径,推动了经济的发展,提高了资源的可利用率^[6]。已有文献对工业共生链进行研究,部分学者开始专注于工业共生过程中社会、经济、制度配置的研究^[7]。曹斌斌等^[8]探究环境规制下政府和制造商分别主导工业共生链时制造商的集中式和分散式决策行为,并分析了废弃物的交易方式及交易动机。Che 等^[9]从浪费共享的角度来研究共生供应链的内部问题,分析共生程度对制造商和供应商的影响。研究结果表明,随着共生程度的增加,供应链各个成员的利润增加,但其未考虑供应商产生的废弃物是否全部可再加工利用。金友良等^[10]认为工业废弃物的合理利用是实现产业升级转型的重要手段,制造商收益共享的建立提升了废弃物综合运用所带来的环境效益和经济效益。陈军等^[11]在政府多种补贴方式下研究工业生态链上、

下游企业的均衡定价问题,研究表明,当政府仅补贴下游企业时,供应链总利润最大。Fraccascia^[12]提出共生供应链可以提高抵御供应链中断风险的能力,并通过模型验证了这一观点。

由于工业共生链成员权力结构的不同会对共生链产生影响。本文在不同权利结构中对工业共生链的定价决策进行了研究。目前,已有较多文献分析不同权利结构对供应链中定价等决策的影响,张国兴等^[13]分别探究制造商主导、零售商主导和双方势均力敌 3 种权利结构下渠道价格对参与方利润的影响,验证 Nash 博弈始终是博弈参与者的下策。孙自来等^[14]从线下传统批发和线上直销两个角度分析制造商和零售商不同权利结构下交叉价格弹性系数对产品销售价格和利润的影响。实验表明,制造商和零售商的利润随着博弈主导地位下降而降低。徐颖等^[15]构建了由制造商、销售商和第三方回收商分别主导闭环双渠道回收模型,研究结果表明,与集中决策相比,分散决策收益非帕累托最优。

综上所述,大部分学者从工业废弃物资源化和不同的权利结构对传统供应链两个方面进行研究。而对不同权利主导的工业共生链决策研究甚少,且不够深入。基于此,本文从不同权利结构视角出发,考虑共生程度、可利用率双因素对工业共生链的影响,研究由单个供应商和单个制造商构成的两级工业共生链在不同权力主导下的生产决策和最优定价问题。本文研究解决以下 3 个问题: a. 不同权利主导下,哪种决策使各参与方和工业共生链总利润达到最优; b. 不同权利主导下,共生程度、可利用率对链内各参与主体的经济效益影响有何不同; c. 是否存在一种决策,可以实现工业共生链成员之间的双赢。本文为共生企业的管理实践和理论研究提出了新的方向。

1 问题描述和模型假设

1.1 问题描述

构建一个废弃物供应商(简称供应商)和一个产品制造商(简称制造商)组成的两级单渠道工业共生链系统。与传统的供应链不同,在工业共生

链中, 供应商和制造商来自不同链中的不同位置, 但由于废弃物的供需关系, 形成了工业共生链(简称共生链)。在完全共生的状态下, 制造商生产产品所需的原材料都来自供应商的废弃物。在不完全共生的状态下, 制造商的原材料中部分来自供应商的废弃物和部分原材料供应商(简称原材料供应商)。通过处理来自供应商的废弃物并将其转化为制造商生产产品所需的原材料, 制造商可以低价购买部分原材料, 从而节约了生产成本, 同时为共生链中的供应商和制造商带来益处, 减少供应商产生废弃物对环境的污染。工业共生链模型如图1所示。

1.2 符号说明

为了便于模型的计算与求解, 本文设置了模

型参数。其中: P_1 为再生原料单位价格(供应商产生废弃物单位交易价格); P_2 为制造商销售产品单位价格; P_0 为原材料单位价格; D_0 和 D 分别为废弃物需求量和产品需求量; c_1 和 c_2 分别为供应商处理废弃物单位成本和制造商对材料加工的单位成本; ε 为废弃物可利用率; η 为投资成本系数; T 为供应商在处理废弃物中投资的固定成本; m 为制造商增加的单位利润值; n 为共生程度; α 为制造商最终产品的最大市场需求量, Π_g 和 Π_z 分别为供应商的利润和制造商的利润; Π 为工业共生链的总利润。供应商主导下工业共生链决策模型记为模型S, 制造商主导下工业共生链决策模型记为模型M, 下文中各变量的下标S, M分别代表模型的种类, 下标g, z分别代表供应商和制造商决策。

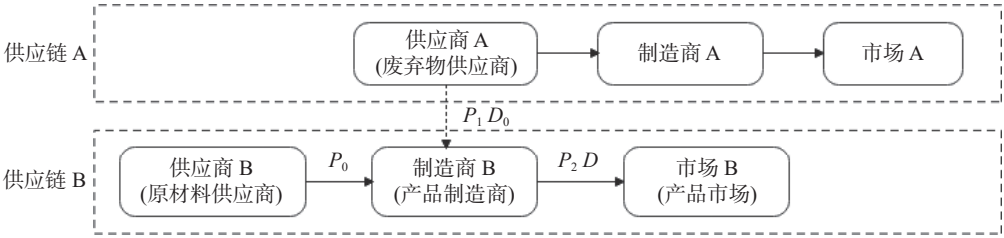


图1 工业共生链模型
Fig.1 Industrial symbiosis chain model

1.3 模型假设

在现实生活中, 工业共生链中各节点企业的决策受到多种因素影响。为了便于研究重点问题, 作如下假设:

- a. 供应商和制造商都以利润最大化作为决策准则。
- b. 新的原材料生产的产品和废弃物为材料生产的产品在外观和质量上无差异, 消费者对两者的购买偏好无明显差异。
- c. 为保证各个利益, 废弃物供应商的成本小于废弃物交易的价格, 制造商的成本小于产品的销售价格。相关参数需满足 $P_0 > P_1$, $P_1 > c_1$, $P_0 > c_1$, $P_1, P_0 > c_2$, $P_2 > P_0 + c_2$, $P_2 > P_1 + c_2$ 。
- d. 消费者对产品的需求是制造商设定的价格线性函数, 最终产品的最大市场需求量为 α , 制造商生产的产品市场需求函数为 $D = \alpha - P_2$ 。
- e. 在完全共生的状态下, 制造商生产所需的所有原料均由废弃物供应商提供。对可用废弃物的需求等于产品的市场需求。在不完全共生的状态下, 制造商所需的原材料只有一部分来自废弃物

供应商, 由此可得, 可用废弃物的需求函数为 $D_0 = nD$, n 为共生程度, 其范围为 $0 \leq n \leq 1$ 。当 $n=0$ 时, 废弃物供应商与制造商无共生关系, 当 $n=1$ 时, 供应商与制造商处于完全共生状态。供应商产生的废弃物可能存在不可加工的废弃物, 所以, 制造商能够有效利用的量为 $D_0\varepsilon$, 其中, ε 为废弃物可利用率, 其范围为 $0 \leq \varepsilon \leq 1$ 。

f. 废弃物供应商在处理废弃物时承担了设备购置成本、技术成本、员工成本等投资, 假设用二次函数表示供应商在处理废弃物中投资的固定成本, 即 $T = \varepsilon^2\eta$ 。

根据上面的假设, 可以构造出废弃物供应商、制造商以及系统共生链的利润函数为

$$\begin{aligned} \Pi_g &= (P_1 - c_1)D_0\varepsilon - T = \\ &= (P_1 - c_1)n(\alpha - P_2)\varepsilon - \varepsilon^2\eta \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \Pi_z &= (P_2 - c_2)D - P_1D_0\varepsilon - P_0(D - D_0\varepsilon) = \\ &= (P_2 - c_2)(\alpha - P_2) - P_1n(\alpha - P_2)\varepsilon - \\ &= P_0(\alpha - P_2 - n(\alpha - P_2)\varepsilon) \end{aligned} \tag{2}$$

$$\Pi = \Pi_g + \Pi_z \tag{3}$$

2 模型的建立与求解

由供应商和制造商组成的两级工业共生链在共生关系形成后, 供应商和制造商的成本结构会发生变化。对供应商而言, 在共生状态下, 将获得废弃物销售收入, 并付出相应的废弃物处理成本和投资处理废弃物的固定费用。对于制造商而言, 共生关系的形成将节约部分的采购成本。由于在不同权力结构下, 价格函数的形式不同, 现讨论供应商主导和制造商主导下工业共生链的决策情况。

2.1 供应商主导下工业共生链的决策(模型 S)

考虑供应商与制造商构成 Stackelberg 博弈, 供应商作为博弈的主导者, 而制造商处于追随者。决策顺序为供应商先确定废弃物最优交易价格, 制造商根据供应商的价格来确定自己的最优销售价格, 然后, 利用逆向归纳求解法求解。首先, 求解制造商的最优销售价格 P_2 。其次, 将最优销售价格 P_2 引入供应商收益模型中, 得到废弃物最优交易价格 P_1^* 。然后, 根据供应商和制造商之间的关系得到制造商的最优价格 P_2^* 。最后, 根据供应商和制造商的最优价格, 得出供应商、制造商和整个共生链的利益。

$$\Pi_g = (P_1 - c_1)D_0\varepsilon - T = (P_1 - c_1)n(\alpha - P_2)\varepsilon - \varepsilon^2\eta \quad (4)$$

$$\Pi_z = (P_2 - c_2)D - P_1D_0\varepsilon - P_0(D - D_0\varepsilon) = (P_2 - c_2)(\alpha - P_2) - P_1n(\alpha - P_2)\varepsilon - P_0(\alpha - P_2 - n(\alpha - P_2)\varepsilon) \quad (5)$$

根据博弈论中的逆向归纳求解法, 首先对式(5)中的 P_2 求一阶偏导和二阶偏导, 可得,

$$\frac{\partial \Pi_z}{\partial P_2} = \alpha + c_2 + (1 - n\varepsilon)P_0 + n\varepsilon P_1 - 2P_2 \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_z}{\partial P_2^2} = -2 < 0 \quad (7)$$

通过式(7)的计算, 易得 Π_z 关于 P_2 的最大值, 且最大值点为一阶偏导等于 0 的点, 令 $\frac{\partial \Pi_z}{\partial P_2} = 0$, 可计算出制造商的销售价格 P_2 。

$$P_2 = \frac{1}{2}(\alpha + c_2 + (1 - n\varepsilon)P_0 + n\varepsilon P_1) \quad (8)$$

将式(8)代入式(4), 求 Π_g 关于 P_1 的一阶导数, 使其为 0, 可得,

$$P_1^* = \frac{\alpha + n\varepsilon c_1 - c_2 + (-1 + n\varepsilon)P_0}{2n\varepsilon} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8), 可得产品的销售价格价格 P_2^* 。

$$P_2^* = \frac{1}{4}(3\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0) \quad (10)$$

此时 P_1^* 和 P_2^* 分别为供应商主导的 Stackelberg 博弈模型中废弃物最优交易价格和产品最优销售价格。

将式(10)代入需求函数中, 可得供应商主导下的产品市场需求量和废弃物需求量。

$$\begin{cases} D^* = \frac{1}{4}(\alpha - n\varepsilon c_1 - c_2 + (-1 + n\varepsilon)P_0) \\ D_0^* = \frac{1}{4}n\varepsilon(\alpha - n\varepsilon c_1 - c_2 + (-1 + n\varepsilon)P_0) \end{cases} \quad (11)$$

将 P_1^* , P_2^* , D^* 和 D_0^* 分别代入式(1), (2)和(3)中, 可得供应商主导时 Stackelberg 博弈模型中, 供应商、制造商和整个工业共生链系统的最优利润。

$$\begin{cases} \Pi_g^* = \varepsilon \left(-\varepsilon\eta + \frac{(-\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0)^2}{8\varepsilon} \right) \\ \Pi_z^* = \frac{1}{16}(-\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0)^2 \\ \Pi^* = \frac{3\alpha^2}{16} - \varepsilon^2\eta + \frac{3}{16}(c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0) \cdot (-2\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0) \end{cases} \quad (12)$$

2.2 制造商主导下工业共生链的决策(模型 M)

考虑供应商与制造商构成 Stackelberg 博弈, 制造商作为博弈的主导者, 而供应商处于追随者。决策顺序为制造商先确定产品销售价格, 而供应商则根据制造商的价格决定废弃物交易价格, 然后, 利用逆向归纳求解, 与模型 S 不同, 制造商需要先确定 m 的单位利润值, 为保证制造商有利可图, 则 $m > 0$ 。

$$P_2 = c_2 + P_1n\varepsilon + P_0 - P_0n\varepsilon + m \quad (13)$$

将式(13)代入式(1), 则供应商的利润为

$$\Pi_g = (P_1 - c_1)n(\alpha - (c_2 + P_1n\varepsilon + P_0 - P_0n\varepsilon + m))\varepsilon - \varepsilon^2\eta \quad (14)$$

首先对式(14)中的 P_1 求一阶偏导, 令 $\frac{\partial \Pi_g}{\partial P_1} = 0$, 可计算出供应商的废弃物交易价格 P_1^* 。

$$P_1^* = \frac{-m + \alpha + n\varepsilon c_1 - c_2 + (-1 + n\varepsilon)P_0}{2n\varepsilon} \quad (15)$$

将 P_1^* 代入式(2), 并对 P_2 求一阶偏导, 令 $\frac{\partial \Pi_z}{\partial P_2} = 0$, 可计算出制造商产品的最优定价 P_2^* 。

$$P_2^* = \frac{1}{4}(-m + 3\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0) \quad (16)$$

此时， P_1^* 和 P_2^* 分别为制造商主导的 Stackelberg 博弈模型中废弃物最优交易价格和产品最优定价，将其代入需求函数中，可解得制造商主导下的产品市场需求量和废弃物需求量。

$$\begin{cases} D^* = \frac{1}{4}(m + \alpha - n\varepsilon c_1 - c_2 + (-1 + n\varepsilon)P_0) \\ D_0^* = \frac{1}{4}n\varepsilon(m + \alpha - n\varepsilon c_1 - c_2 + (-1 + n\varepsilon)P_0) \end{cases} \quad (17)$$

将 P_1^* ， P_2^* ， D^* 和 D_0^* 分别代入式(1)，(2)和(3)中，可得制造商主导时 Stackelberg 博弈模型中，供应商、制造商和整个共生链系统的最优利润。

$$\begin{cases} \Pi_g^* = \varepsilon \left(-\varepsilon\eta + \frac{(-\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0)^2 - m^2}{8\varepsilon} \right) \\ \Pi_z^* = \frac{1}{16}(m + \alpha - n\varepsilon c_1 - c_2 + (-1 + n\varepsilon)P_0)^2 \\ \Pi^* = \frac{1}{16} \left(-(m - 3\alpha)(m + \alpha) - 16\varepsilon^2\eta + (c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0)(-2(m + 3\alpha) + 3n\varepsilon c_1 + 3c_2 + (3 - 3n\varepsilon)P_0) \right) \end{cases} \quad (18)$$

综上，得到了供应商和制造商两种不同主导下供应商和制造商的价格、需求函数和利润，如表1所示。

表1 不同权力主导下的价格、需求和利润
Tab.1 Prices, demand, and profits under different powers

变量	供应商主导	制造商主导
P_1^*	$\frac{\alpha + n\varepsilon c_1 - c_2 + (-1 + n\varepsilon)P_0}{2n\varepsilon}$	$\frac{-m + \alpha + n\varepsilon c_1 - c_2 + (-1 + n\varepsilon)P_0}{2n\varepsilon}$
P_2^*	$\frac{1}{4}(3\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0)$	$\frac{nc_1 + \varepsilon(-m + 3\alpha + c_2) + (-n + \varepsilon)P_0}{4\varepsilon}$
D_0^*	$\frac{1}{4}n\varepsilon(\alpha - n\varepsilon c_1 - c_2 + (-1 + n\varepsilon)P_0)$	$\frac{1}{4}n\varepsilon(m + \alpha - n\varepsilon c_1 - c_2 + (-1 + n\varepsilon)P_0)$
D^*	$\frac{1}{4}(3\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0)$	$\frac{1}{4}(m + \alpha - n\varepsilon c_1 - c_2 + (-1 + n\varepsilon)P_0)$
Π_g^*	$\varepsilon \left(-\varepsilon\eta + \frac{(-\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0)^2}{8\varepsilon} \right)$	$\varepsilon \left(-\varepsilon\eta + \frac{(-\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0)^2 - m^2}{8\varepsilon} \right)$
Π_z^*	$\frac{1}{16}(-\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0)^2$	$\frac{1}{16}(m + \alpha - n\varepsilon c_1 - c_2 + (-1 + n\varepsilon)P_0)^2$
Π^*	$\frac{3\alpha^2}{16} - \varepsilon^2\eta + \frac{3}{16}(c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0) \cdot (-2\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0)$	$\frac{1}{16} \left(-(m - 3\alpha)(m + \alpha) - 16\varepsilon^2\eta + (c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0)(-2(m + 3\alpha) + 3n\varepsilon c_1 + 3c_2 + (3 - 3n\varepsilon)P_0) \right)$

3 模型分析

通过模型对比分析和模型参数分析对模型进行进一步的研究，并得出一些命题。以下命题均在满足基本假设且符合现实意义的条件下成立。

a. 对比分析不同权力结构对工业共生链成员的交易价格、销售价格、需求量、利润以及系统总利润的影响。

推论1 供应商主导下废弃物的交易价格和产品销售价格均高于制造商主导时。制造商主导下产品的需求量和废弃物的需求量均高于供应商主导时。

证明 $P_{1,S} - P_{1,M} = \frac{\alpha + n\varepsilon c_1 - c_2 + (-1 + n\varepsilon)P_0}{2n\varepsilon} - \frac{-m + \alpha + n\varepsilon c_1 - c_2 + (-1 + n\varepsilon)P_0}{2n\varepsilon} = \frac{m}{2n\varepsilon} > 0$ 。 $P_{2,S} - P_{2,M} > 0$ ， $D_S - D_M < 0$ ， $D_{0,S} - D_{0,M} < 0$ 的证明方法同上。

推论2 供应商主导下，供应商的利润大于制造商主导时供应商的利润，而制造商的利润则

低于制造商主导时制造商的利润。

证明 $\Pi_{g,S} - \Pi_{g,M} = \varepsilon \left(-\varepsilon\eta + \frac{(-\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0)^2}{8\varepsilon} \right) - \varepsilon \left(-\varepsilon\eta + \frac{(-\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P)^2 - m^2}{8\varepsilon} \right) = \frac{m^2}{8} > 0$ 。 $\Pi_{z,S} - \Pi_{z,M} < 0$ 的证明方法同上。

推论3 不同权力结构下共生链的总收益随 m 的变化而变化，存在 m 大于某个阈值时供应商主导下的共生链的总收益高于制造商主导时，或 m 小于某个阈值时供应商主导下总收益则低于制造商主导时。

证明 $\Pi_S - \Pi_M = \frac{1}{16}m(m - 2\alpha + 2n\varepsilon c_1 + 2c_2 + (2 - 2n\varepsilon)P_0)$

令 $\frac{1}{16}m(m - 2\alpha + 2n\varepsilon c_1 + 2c_2 + (2 - 2n\varepsilon)P_0) = 0$ ，可得 $\begin{cases} m_1 = 0 \\ m_2 = -2(-\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0) > 0 \end{cases}$

当 $0 < m < -2(-\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0)$ 时， $\Pi_S - \Pi_M < 0$ ；当 $m > -2(-\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0)$ 时， $\Pi_S - \Pi_M > 0$ 。

由推论 1 可知, 在供应商主导下, 废弃物的交易价格和产品销售价格增高时, 将不断削弱制造商和消费者的利益, 因此, 与之对应的废弃物需求量和产品需求量将减少。制造商主导下对于消费者是更有利的, 产品销售价格低更能获得消费者的青睐, 从而提高了制造商的利润。对于整个共生链而言, 这是经济效益和环境效益的共赢, 不仅减少废弃物排放, 保护环境, 还能提高链内的总收益。推论 2 说明, 各主导方都以自身利润最大化为目标, 供应商主导时供应商的利润大于制造商主导时, 制造商主导时制造商利润则高于供应商主导时。由推论 3 可知, 共生链的总收益随 m 的变化而变化, 当 $0 < m < -2(-\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0)$ 时, 供应商主导下的共生链的总收益低于制造商主导时; 当 $m > -2(-\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0)$ 时, 供应商主导下的共生链的总收益大于制造商主导时。由此说明, 制造商主导时可适当增加单位利润值 m , 从而提高产品的销售价格, 以此来获得更多的利润, 同时为获得更高利润, 制造商会不断压低废弃物的交易价格。随着单位利润值的提高, 不同主导下供应商的利润差逐渐增大。

b. 分析共生程度和可利用率对不同权力主导下各成员的交易价格、销售价格、利润以及系统总利润的影响。

推论 4 在供应商主导下, 废弃物交易价格、产品销售价格均与共生程度、可利用率分别呈负相关。

证明 $\frac{\partial P_1}{\partial n} = \frac{-\alpha + c_2 + P_0}{2n^2\varepsilon} < 0$; $\frac{\partial P_1}{\partial \varepsilon} = \frac{-\alpha + c_2 + P_0}{2n\varepsilon^2} < 0$ 。所以, 废弃物交易价格与共生程度、可利用率分别呈负相关。同理可证, $\frac{\partial P_2}{\partial n} < 0$, $\frac{\partial P_2}{\partial \varepsilon} < 0$ 。

推论 5 在供应商主导下, 供应商利润、制造商利润、共生链总收益均与共生程度、可利用率分别呈正相关。

证明 $\frac{\partial \Pi_g}{\partial n} = \frac{1}{4}\varepsilon(c_1 - P_0)(-\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0) > 0$; $\frac{\partial \Pi_g}{\partial \varepsilon} = \frac{1}{4}(-8\varepsilon\eta + n(c_1 - P_0)(-\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0)) > 0$ 。

所以, 供应商利润与共生程度、可利用率分别呈正相关。同理可证, $\frac{\partial \Pi_z}{\partial n} > 0$, $\frac{\partial \Pi_z}{\partial \varepsilon} > 0$, $\frac{\partial \Pi}{\partial n} > 0$, $\frac{\partial \Pi}{\partial \varepsilon} > 0$ 。

由推论 4 和推论 5 可知, 在供应商主导下废弃物交易价格、产品销售价格与共生程度成负相关, 供应商的利润、制造商的利润、共生链的总

收益与共生程度成正相关。共生程度越高, 废弃物交易价格和产品销售价格就越低, 制造商和消费者基于物美价廉的心理, 增加了产品需求, 同时提高了各参与方的经济收益。在供应商主导下, 废弃物交易价格、产品销售价格是关于废弃物可利用率减函数的, 随着可利用率增加, 交易价和销售价减小, 此时对于制造商购买原材料和消费者购买产品十分有利, 这将会增加产品需求量和废弃物需求量, 从而促进各方利润和共生链的总利润上升。所以, 供应商的利润、制造商的利润、共生链的总收益与废弃物可利用率成正比关系。

推论 6 在制造商主导下, 废弃物交易价格与共生程度、可利用率的相关性取决于单位利润值。

证明

$$\frac{\partial P_1}{\partial n} = \frac{m - \alpha + c_2 + P_0}{2n^2\varepsilon}, \begin{cases} 0 < m < \alpha - c_2 - P_0, \frac{\partial P_1}{\partial n} < 0 \\ m > \alpha - c_2 - P_0, \frac{\partial P_1}{\partial n} > 0 \end{cases}$$
$$\frac{\partial P_1}{\partial \varepsilon} = \frac{m - \alpha + c_2 + P_0}{2n\varepsilon^2}, \begin{cases} 0 < m < \alpha - c_2 - P_0, \frac{\partial P_1}{\partial \varepsilon} < 0 \\ m > \alpha - c_2 - P_0, \frac{\partial P_1}{\partial \varepsilon} > 0 \end{cases}$$

推论 7 在制造商主导下, 产品销售价格与共生程度、可利用率分别呈负相关。

证明 $\frac{\partial P_2}{\partial n} = \frac{1}{4}\varepsilon(c_1 - P_0) < 0$, $\frac{\partial P_2}{\partial \varepsilon} = \frac{1}{4}n(c_1 - P_0) < 0$ 。

推论 8 在制造商主导下, 供应商利润、制造商利润、共生链总收益与共生程度、可利用率分别呈正相关。

证明 $\frac{\partial \Pi_g}{\partial n} = \frac{1}{4}\varepsilon(c_1 - P_0)(-\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0) > 0$, $\frac{\partial \Pi_g}{\partial \varepsilon} = \frac{1}{4}(-8\varepsilon\eta + n(c_1 - P_0)(-\alpha + c_2 + n\varepsilon(c_1 - P_0) + P_0)) > 0$ 。

所以, 供应商利润与共生程度、可利用率分别呈正相关。同理可证, $\frac{\partial \Pi_z}{\partial n} > 0$, $\frac{\partial \Pi_z}{\partial \varepsilon} > 0$, $\frac{\partial \Pi}{\partial n} > 0$, $\frac{\partial \Pi}{\partial \varepsilon} > 0$ 。

由推论 6 可知, 废弃物的交易价格与共生程度、可利用率的关系取决于单位利润值。当单位利润值大于某一阈值时, 交易价格与共生程度、可利用率呈正比; 当单位利润值小于某一阈值时, 交易价格与共生程度、可利用率呈反比。推论 7 和推论 8 表明, 在制造商主导下, 产品的销

售价格随着共生程度和可利用率的增加而减少, 供应商的利润、制造商的利润、共生链的总收益随着共生程度、废弃物可利用率的增加而增加。共生程度和可利用率越高, 链与链之间产生的废弃物就越少, 因此, 减少了环境污染, 促进了资源可持续发展。

4 算例分析

基于上述分析, 为了进一步验证分析结果的有效性及其可行性, 采用数值算例来分析不同权力结构下共生程度、可利用率、单位增加的利润值和市场最大容量对各个成员单价、利润和共生链系统的总收益的变化情况。现以钢铁行业为例, 在生产钢铁过程中会产生大量的水渣, 为了减少浪费、环境污染和生产成本, 钢铁厂将这些水渣进行微处理, 提炼出超细矿渣微粉销售给建材厂, 超细矿渣微粉是建材厂生产水泥和混凝土的原材料之一。在这过程中, 钢铁厂和建材厂本不属于一个供应链, 但由于一方的废弃物可以作为另一方的原料, 他们因为利益选择合作, 此时钢铁厂-建材厂构成了共生链。钢铁厂是产生废弃物的供应商, 建材厂为共生链的制造商。数据参考河南 XP 钢铁厂、江苏 FSD 建材厂和文献 [9-10], 相关参数为: $\eta=800$, $n=0.7$, $\varepsilon=0.7$, $\alpha=200$ t, $m=20$ 元, $c_1=15$ 元/t, $c_2=30$ 元/t, $P_0=110$ 元/t。

4.1 共生程度分析

在供应商和制造商分别主导的情况下, 不同共生程度下的供应商和制造商的最优价格和收益如图 2~4 所示, 在这两种情况下, 供应商和制造商的最优价格都呈下降趋势。供应商最优价格呈非线性趋势, 变化幅度逐渐减小。而制造商的最优价格呈线性变化趋势, 并以一定的速率变化。随着单价的降低, 制造商和消费者对原料和产品的需求量持续增长。同时随着共生程度的增加, 供应商和制造商的利润也不断增加, 供应商和制造商凭借各自的优势获得相对较高的利润。

在本文的假设中, 由于供应商将废弃物变废为宝, 所以, 处于共生状态下的供应商比非共生状态的供应商获得更高利润。对制造商来说, 废弃物交换将会带来一定的收入和成本, 制造商则根据最终的利润值是否大于非共生下的利润值来判断是否共生, 只有利润大于非共生下利润, 制造商才有动力进行废弃物的交易, 花费更低的价

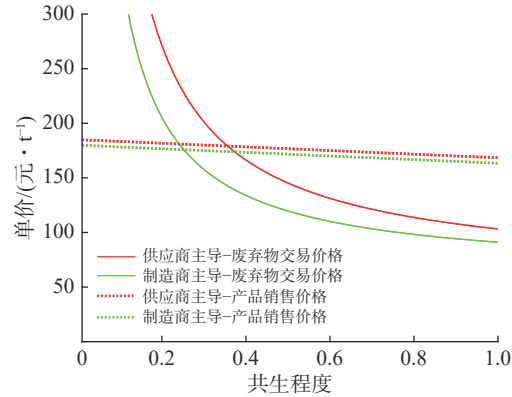


图 2 共生程度对单价的影响

Fig. 2 Degree of symbiosis influence on price

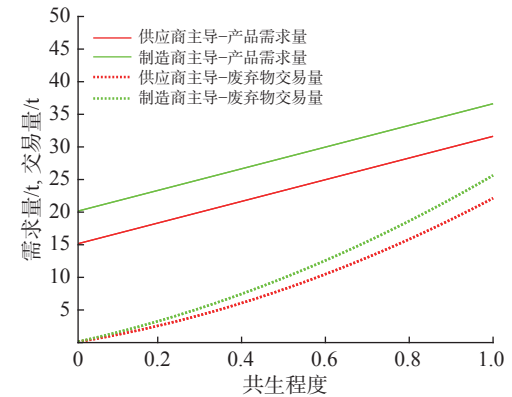


图 3 共生程度对需求量的影响

Fig. 3 Degree of symbiosis influence on demand

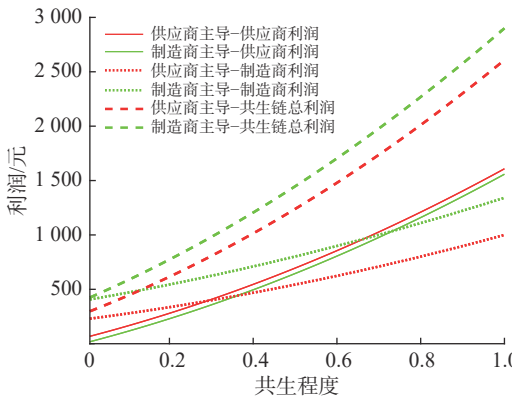


图 4 共生程度对各方利润和总利润的影响

Fig. 4 Degree of symbiosis influence on profit of all parties and total profit

格购买到同质的原材料, 以获得更高的利润。

4.2 可利用率分析

在供应商和制造商分别主导的情况下, 可利用率与供应商和制造商的最优价格和收益的关系如图 5~7 所示, 在这两种情况下, 供应商和制造商的最优价格都呈下降趋势。制造商最优价格呈非线性趋势, 变化幅度逐渐减小。从图中可以看出, 当可利用率过低时, 供应商和制造商皆无利

润,随着可利用率的增加,供应商和制造商的利润也不断增加。制造商主导下制造商利润明显高于供应商主导。制造商主导下共生链的总收益先高于供应商主导,由于供应商主导共生链的总收益增长幅度远大于制造商主导,当可利用率达到某一阈值时,制造商主导下共生链的总收益低于供应商主导。这说明随着可利用率的增加,供应

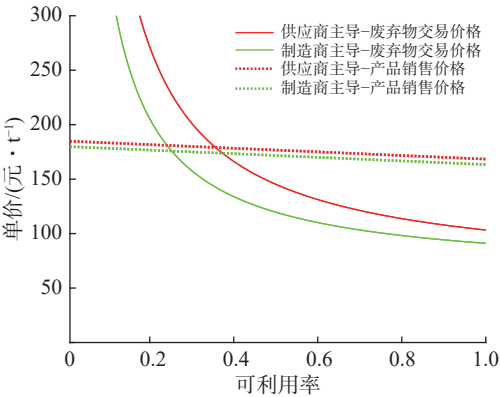


图 5 可利用率对单价的影响

Fig. 5 Availability impact on price

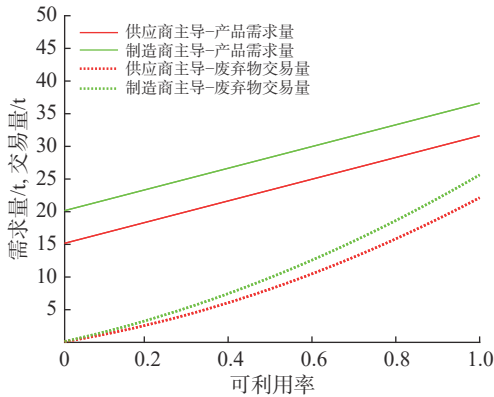


图 6 可利用率对需求量的影响

Fig. 6 Availability impact on demand

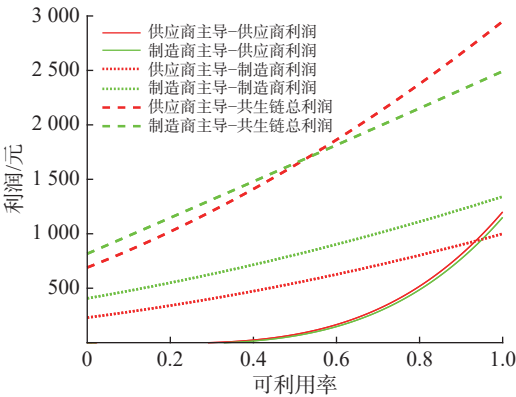


图 7 可利用率对各方利润和总利润的影响

Fig. 7 Availability impact on profit of all parties and total profit

商主导对共生链系统更有利。

4.3 单位增加利润值分析

由图 8 和图 9 可知,制造商主导下 m 值的变化会影响供应商交易价格、制造商销售价格、各方利润和共生链总利润。随着制造商产品单位利润值的增加,废弃物交易价格和产品销售价格降低。由于交易价格下降幅度远大于消费价格,制造商以低价购买原料,再以缓慢降价的方式售于消费者。因此,供应商的收益逐渐减少,制造商的收益逐渐增加,总收益随着 m 值先增大后逐渐趋于平衡状态。

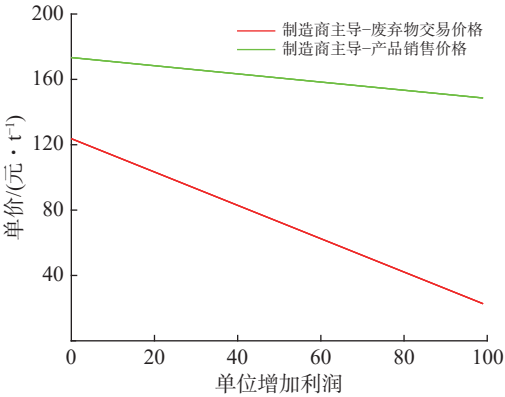


图 8 单位增加利润值对单价的影响

Fig.8 Impact of increase profit per unit on price

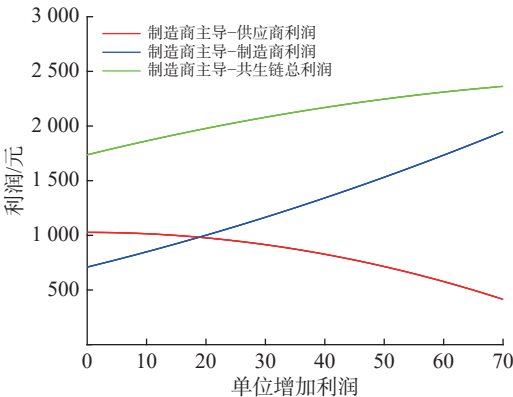


图 9 单位增加利润值对各方利润和总利润的影响

Fig.9 Impact of increase profit per unit on profits of all parties and total profits

4.4 市场最大容量分析

在供应商主导和制造商主导两种权力结构下,供应商收益和制造商收益以及共生链系统总收益都随着产品市场的最大容量的增加而增加。制造商主导下共生链的总收益大于供应商主导下的共生链总收益。由图 10 可以看出,无论谁主导供应商利润不变,当市场最大容量较小时,企业

会入不敷出。纵观企业，当共生程度、可利用率、单位利润值一定时，制造商主导时对各方最有利。

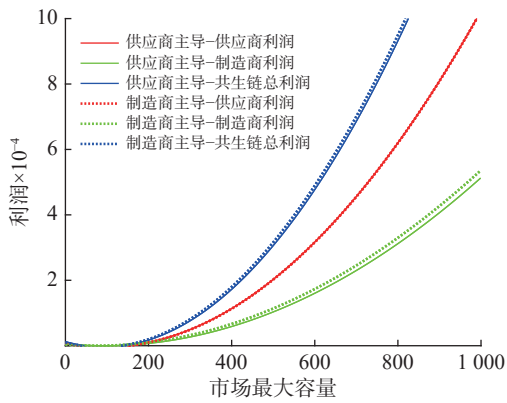


图 10 市场最大容量对各方利润和总利润的影响
Fig.10 Maximum market capacity impact on profits of all parties and total profits

5 结束语

在资源日益稀缺的今天，提高资源利用效率，减少闲置资源显得尤为重要，工业共生链中废弃物共享的实践具有启示意义。本文通过 Stackelberg 博弈分析在不同的权利主导的共生链系统中废弃物交易价格和产品最优定价策略，得到了最优定价和最大利润并进行对比，进一步分析共生程度、可利用率、单位增加的利润值和市场最大容量对各个成员单价、利润和共生链系统的总收益的影响。结果表明：

- a. 工业共生链中的各参与方收益与共生程度有关。在供应商与制造商分别主导下，供应商利润、制造商利润和共生链总收益都会随着共生程度的增加而增加，共生链各方应尽最大努力帮助共生链实现最大的共生关系。
- b. 可利用率与共生链各参与方利润有关。在供应商和制造商分别主导的情况下，虽然供应商和制造商的最优价格都呈上升趋势，但是，当可利用率过低时供应商和制造商基本无利润。随着可利用率的增加，供应商、制造商和共生链的利润也不断增加。
- c. 权力结构的变化会影响供应商、制造商和共生链的相对利益。在供应商主导下，制造商收益较小，且共生链总收益会随着共生程度的变化而变化。制造商主导时共生链的总利润大于供应商

主导共生链的利润，且制造商利润明显高于供应商主导。无论谁占据主导地位，供应商和制造商在价格决策和收益上都处于领先地位。因此，企业应努力获取自身的竞争优势，获得绝对的主导地位。供应商和制造商应根据其主导地位的变化灵活调整定价策略，以获得更多的利润。

d. 单位利润值的变化对供应商主导的共生链无影响，对制造商主导的共生链有重要影响。当制造商处于主导地位时，制造商的单位利润值会影响共生链的总收益。随着单位利润值增加，制造商的利润也会增加，且逐渐超过供应商的利润。而供应商的收益则是呈现逐渐减少的趋势，共生链的总收益幅度也是先增大后减小。

综上所述，不同权力主导会导致各参与方最优价格和最大收益之间出现差异。共生程度、可利用率和市场最大容量皆会影响供应商和制造商之间的最优决策。然而，制造商的单位利润值只会影响制造商主导下的决策。本文的研究成果对产生共生关系的企业提供了一定的参考价值。但该研究也存在一些不足之处，本文仅考虑了单一供应商和单一制造商之间的共生关系，在以后的研究中，可以在本文的基础上，进一步分析单一供应商和多个制造商之间的共生关系。

参考文献：

[1] HE M, JIN Y L, ZENG H X, et al. Pricing decisions about waste recycling from the perspective of industrial symbiosis in an industrial park: a game model and its application[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 251: 119417.

[2] BOIX M, MONTASTRUC L, AZZARO-PANTEL C, et al. Optimization methods applied to the design of eco-industrial parks: a literature review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87: 303–317.

[3] 刘光富, 鲁圣鹏, 李雪芹. 产业共生研究综述: 废弃物资源化协同处理视角 [J]. *管理评论*, 2014, 26(5): 149–160.

[4] 贤集网. 我国钢铁工业固废利用概况、存在问题及应对措施 [EB/OL]. [2019-10-23]. https://www.xianjichina.com/special/detail_425650.html.

[5] ZHANG X Q, SU Y S, YUAN X G. Government reward-penalty mechanism in closed-loop supply chain based on dynamics game theory[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2018, 2018: 3541823.

[6] JATO-ESPINO D, RUIZ-PUENTE C. Bringing facilitated industrial symbiosis and game theory together to strengthen

- (编辑:石 瑛)