

质量和价格依赖需求的供应链演化博弈决策机制

杨宏林 周超

(湖南大学, 湖南省、长沙市, 410082)

摘要: 针对制造商和零售商构成的两级供应链, 基于产品质量和价格依赖的线性需求函数, 构建了两级供应链的演化博弈模型, 分析长期竞争中有限理性制造商和零售商之间的决策选择和收益分配机制。博弈演化结果表明, 制造商与零售商合作的概率随着零售商调整策略成本的增加而减少, 随违约收益和集中决策超额收益的增加而增大, 存在一个制造商和零售商合作概率最大的超额利润分配比例。

关键词: 质量和价格依赖; 演化博弈; 合作概率; 收益分配

中图分类号: F224

文献标识码: A

0 引言

随着市场竞争的愈发激烈, 企业需要提供优质低价的产品满足消费者需求, 并通过合作和优势互补来扩大市场占有率。易讯、京东通过供应链战略合作实现了产品结构优化与成本降低, 通过合理利用供应链内外部资源, 协调供应链实现价值最大化。目前, 许多文献对不同情形下(采购、营销和质量等)供应链协调进行了研究。例如, Corbett 等(2000)分析不对称信息和完全信息下供应商的数量折扣策略, 实现不同情形的供应链协调^[1]。Qi 等(2004)在不确定需求下, 考虑了单个供应商和零售商构成的供应链在需求偏差下的供应链协调^[2]。在已有的供应链协调基础上, 学者进一步将质量竞争策略引入供应链的研究中。肖迪等(2013)研究两个供应商和一个制造商在质量和价格竞争的情况下, 供应链的协调策略^[3]。鲁其辉等(2009)通过对价格和质量竞争下的两层供应链模型的研究, 发现两条供应链同时采用协调策略时, 可能出现囚徒困境现象^[4]。曹柬等(2006)则研究了由制造商和供应商组成的二级供应链中, 通过考虑产品质量失误情况下的最优质量水平和损失分配系数, 实现了供应链局部最优和全局最优的一致^[5]。

已有学者研究供应链成员的价格和质量协调时隐含着一个假设前提, 即制造商和零售商是完全理性的, 能快速选择最优策略。然而, 这一假设前提在现实供应链决策中缺乏有力的支持。在现实商业活动中, 供应链参与方并非完全理性, 而表现出有限理性的决策行为^[6]。相当一部分制造商和零售商往往根据自身利益最大化来进行决策, 难以实现整体利润最大化。有限理性的供应链参与方经过不断的模仿学习渐进地实现动态平衡^[7-8]。黄敏镁(2010)针对供应链产品协同开发, 研究了有限理性条件下制造商和供应商合作、成本和利润分配机制, 发现合作超额收益能促进双方协同合作^[9]。Tian 等(2014)通过建立基于演化博弈理论系统动力学系统, 研究中国绿色供应链的推广问题, 发现相对于消费者补贴政策, 制造商补贴能促进中国绿色供应链的发展^[10]。

本文从供应链集中和分散决策条件下, 获取质量和价格依赖需求条件下的制造商和零售商最优决策; 运用演化博弈对非理性供应链参与方演化决策过程进行刻画。本文的主要内容如下: 第二部分进行了变量定义和模型构建; 第三部分分析了供应链演化及其稳定性; 第四

部分分析了奖惩机制下供应链演化机制；最后运用数值模拟了供应链演化及其参数灵敏度。

1 模型描述

考虑一个由上游制造商和下游零售商构成的两级供应链。制造商以单位基本成本生产产品，同时制造商负责对产品进行质量控制，制造商决定产品的批发价格。零售商面临顾客的线性需求，客户的需求数依赖于产品的质量和销售价格，商品的售价由零售商依据市场需求等相关因素决定。在供应链参与方决策过程中，制造商和零售商可以选择不同的决策方式，即可以选择分散决策和集中决策。

1.1 变量与假设说明

本文中可能用到的变量有：

表1 模型变量符号

符号	符号说明	符号	符号说明
p	零售商的销售价格	a	市场基础需求，反应产品的吸引力
e	制造商的质量水平	b	消费者的价格敏感程度
w	制造商的批发价格	r	消费者的质量敏感程度
c	制造商生产以单位产品的成本	η	制造商的质量努力成本系数

本文的假设如下：

(1) 零售商面临的市场需求与产品的价格和质量有关，需求水平是价格和质量的线性函数，市场的需求表示为： $D = a - bp + re$ 。

(2) 产品的质量成本随着质量水平的提高加速上升，产品的质量水平越高，提高相同质量水平所付出的成本就越多。由此，假设成本是质量水平的二阶函数，制造商质量控制的成本可以表示为： $C_e = \frac{1}{2} \eta e^2$ 。

(3) 假设不考虑零售商的库存问题，零售商不需要考虑库存问题，其订购的产品能全部卖出。因此，相应的利润函数表达如下：

$$\text{制造商总利润为： } \pi_M = (w - c)(a - bp + re) - \frac{1}{2} \eta e^2 \quad (1)$$

$$\text{零售商总利润为： } \pi_R = (p - w)(a - bp + re) \quad (2)$$

$$\text{供应链总利润为： } \pi_S = (p - c)(a - bp + re) - \frac{1}{2} \eta e^2 \quad (3)$$

1.2 模型求解

1.2.1 分散决策策略分析

分散决策情况的斯塔克伯格 (Stackelberg) 博弈，由制造商和零售商从自身利益最大化出发进行决策。决策顺序为制造商先决定批发价格和质量，零售商选择使自己利益最大化的零售价格。采用逆向归纳法，首先对式(2)关于零售价格求 p 求偏导，可得：

$$p = \frac{(a + re + bw)}{2} \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)可得制造商决定的最优质量水平 $e_0 = (ar - brc) / (4\eta b - r^2)$ 和批发价格 $w_0 = (2\eta a - r^2 c + 2\eta bc) / (4\eta b - r^2)$ 。在分散决策的情况下,零售商最优零售价格为 $p_0 = (3\eta a - r^2 c + 2\eta bc) / (4\eta b - r^2)$, 商品的市场需求为 $D_0 = (\eta ab - \eta b^2 c) / (4\eta b - r^2)$ 。

通过计算,制造商的利润为

$$\pi_M^N = \frac{\eta(a - bc)^2}{2(4\eta b - r^2)}$$

零售商的利润为

$$\pi_R^N = \frac{b(\eta a - \eta bc)^2}{(4\eta b - r^2)^2}$$

供应链的总利润为所示

$$\pi_T^N = \pi_R^N + \pi_M^N = \frac{(2b\eta - r^2)(a - bc)^2}{2(4\eta b - r^2)^2}$$

1.2.2 集中决策策略分析

当制造商和零售商采用集中决策方式时,制造商和零售商结成同盟,根据供应链整体利润最大化,共同决定产品的质量水平和零售价格。对式(3)关于求 p , e 求偏导。求得制造商最优产品质量水平为 $e_1 = (ar - brc) / (2\eta b - r^2)$, 零售商最优零售价格为 $p_1 = (\eta a + \eta bc - r^2 c) / (2\eta b - r^2)$, 需求为 $D = (\eta abc - \eta b^2 c) / (2\eta b - r^2)$ 。此时供应链的总利润如下:

$$\pi_T^C = \eta(a - bc)^2 / 2(2\eta b - r^2)$$

用比值法比较 π_T^C 与 π_T^N 的大小可得

$$\frac{\pi_T^N}{\pi_T^C} = \frac{(2b\eta - r^2)(a - bc)^2 / 2(4\eta b - r^2)^2}{\eta(a - bc)^2 / 2(2\eta b - r^2)} = \frac{(2\eta b - r^2)^2}{(4\eta b - r^2)^2} < 1$$

即 $\pi_T^C > \pi_T^N$, 表明集中决策下供应链能够获得更多超额利润 $V = \pi_T^C - \pi_T^N > 0$, 如果采用合同分享机制,制造商以比例 $\alpha \in (0, 1)$ 分享超额利润,由于集中决策的利润增大,我们假设零售商和制造商的利润分别为 $\pi_M^C = \pi_M^N + \alpha V$, $\pi_R^C = \pi_R^N + (1 - \alpha)V$ 。在集中决策和超额利润分配比例为 α 条件下,制造商批发价格可定义为关于 α 的函数形式 $w_1 = f(\alpha)$ 。从零售商角度可得出 w_1 与 α 之间的关系为

$$(p_1 - w_1)(a - bp_1 + re_1) - \pi_R^N = (1 - \alpha)V$$

1.2.3 单方面违约策略分析

制造商、零售商策略为合作、不合作。当制造商、零售商参与到供应链中,零售商方面违约,由于制造商先行制定决策,不能事先获知零售商采取违约策略,因此依旧采用对整体供应链最优的批发价格 w_1 和质量水平 e_1 , 零售商根据既定的产品质量水平,选择对自己最有利的零售价格销售产品,零售商利润增加为 $\pi_R^N + E_1$ 。此时制造商制定的价格会偏离自身最优批发价格和质量水平,因此制造商的利润减少为 $\pi_M^N - E_2$ 。

制造商、零售商策略为不合作、合作。当制造商、零售商参与到供应链中，零售商最初策略为合作，制造商选择不合作策略。制造商首先选择对自身最优的批发价格 w_0 和产品质量 e_0 ，零售商得知制造商的决策后，调整自己的决策机制，采取对自己最优的价格销售产品，零售商的选择变为不合作。因此，该情况下的策略组合与“不合作、不合作”相同，但是由于零售商调整自身的策略，将付出成本 U ，导致利润减少为 $\pi_R^N - U$ ，制造商的利润为 π_M^N 。制造商和零售商演化博弈的支付矩阵表示如表 2 所示：

表 2 制造商和零售商的支付矩阵

	合作	不合作
合作	$\pi_M^N + \alpha V, \pi_R^N + (1 - \alpha)V$	$\pi_R^N - E_2, \pi_R^N + E_1$
不合作	$\pi_M^N, \pi_R^N - U$	π_M^N, π_R^N

2 供应链演化及其稳定性分析

2.1 复制动态方程分析

演化主体分别为制造商和零售商，他们在长期的决策中，制造商采用合作的概率为 x ，不合作的概率为 $1 - x$ ，相应的零售商采用合作策略的概率为 y ，不合作的概率为 $1 - y$ 。制造商采取“合作”、“不合作”的期望得益为 u_{1c}, u_{1n}, u_1 ，由博弈矩阵可得：

$$\begin{aligned} u_{1c} &= y(\pi_M^N + \alpha V) + (1 - y)(\pi_M^N - E_2) \\ u_{1n} &= y\pi_M^N + (1 - y)\pi_M^N \\ u_1 &= xu_{1c} + u_{1n} \end{aligned}$$

制造商的复制动态方程为

$$\frac{dx}{dt} = x(u_{1c} - u_1) = x(1 - x)[(\alpha V + E_2)y - E_2]$$

同理，假设零售商采取“合作”、“不合作”的期望得益为 u_{2c}, u_{2n} 和平均得益 u_2 ：

$$\begin{aligned} u_{2c} &= x[\pi_R^N + (1 - \alpha)V] + (1 - x)(\pi_R^N - U) \\ u_{2n} &= x[\pi_R^N + E_1] + (1 - x)\pi_R^N \end{aligned}$$

零售商的复制动态方程：

$$\frac{dy}{dt} = y(u_{2c} - u_2) = y(1 - y)[(-(\alpha V - U)E_1 + U)x - U]$$

制造商策略选择的演化稳定性分析，根据制造商的复制动态方程，进行进一步的分析。令 $\frac{dx}{dt} = 0$ ，可得 $y_1 = \frac{E_2}{\alpha V + E_2}$ ，显然 $y_1 \in (0, 1)$ ，根据复制动态方程的稳定性定理，有以下

三种性质：

① 当 $y = y_1 = \frac{E_2}{\alpha V + E_2}$ 时， $\frac{dx}{dt} = 0$ 这表明所有的 x 都是稳定策略。

② 当 $y > y_1 = \frac{E_2}{\alpha V + E_2}$ 时， $\frac{dx}{dt} > 0$ ， $x = 1$ 为进化稳定策略，根据演化博弈的性质

可知制造商进化稳定策略为合作。

③ 当 $y < y_1 = \frac{E_2}{\alpha V + E_2}$ 时， $\frac{dx}{dt} < 0$ ，此时 $x = 0$ 为进化稳定策略，根据演化博弈的

性质可知制造商进化稳定策略为不合作。

接下来探索零售商策略选择的演化稳定性, 据制造商的复制动态方程, 进行进一步的分析。令 $\frac{dy}{dt} = 0$, 可得 $x_1 = \frac{U}{(1-\alpha)V - E_1 + U}$, 显然 $x_1 \in (0, 1)$, 根据复制动态方程的稳定性定理, 有以下三种性质:

① $x = x_1 = \frac{U}{(1-\alpha)V - E_1 + U}$ 时, $\frac{dy}{dt} = 0$, 此时所有 y 都是稳定策略。

② $x > x_1 = \frac{U}{(1-\alpha)V - E_1 + U}$ 时, $\frac{dy}{dt} > 0$, 此时所有 $y = 1$ 是进化稳定策略, 此时零售商进化稳定策略为合作。

③ $x < x_1 = \frac{U}{(1-\alpha)V - E_1 + U}$ 时, $\frac{dy}{dt} > 0$, 此时所有 $y = 0$ 是进化稳定策略, 复制动态方程的稳定性定理零售商进化稳定策略为不合作。

结合制造商和零售商的复制动态方程, 演化博弈共有五个可能的平衡点 $(1,1)$, $(1,0)$, $(0,1)$, $(0,0)$ 和 $(\frac{U}{(1-\alpha)V - E_1 + U}, \frac{E_2}{\alpha V + E_2})$ 。综上, 制造商和零售商的演化策略可用图 1 表示。

图 1 显示制造商和零售商的最终稳定点为 $A = (0, 0)$ 和 $D = (1, 1)$, 制造商和零售商的稳定策略为 (合作, 合作) 和 (不合作, 不合作)。当两者初始策略选择落在区域 I 内时, 最终的演化稳定策略点是 A , 表明在长期的演化决策中, 制造商和零售商均不合作。当两者初始策略落在区域 II 时, 最终的演化稳定策略点是 D , 在长期的演化决策中, 制造商和零售商均合作。制造商和零售商选择策略的概率取决于区域 I 和 II 的面积, 区域 I 的面积为:

$$S_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{U}{(1-\alpha)V - E_1 + U} + \frac{E_2}{\alpha V + E_2} \right)$$

其中 $S_2 = 1 - S_1$, $V = \pi_T^C - (\pi_R^N + \pi_M^N)$ 。当 $S_1 > S_2$ 时, 制造商和零售商选择合作的概率小于不合作的概率; 当 $S_1 < S_2$ 时, 双方选择合作的概率大于不合作的概率。通过分析影响 I 和 II 区域面积的因素, 获得影响制造商和零售商演化策略的原因。图 1 表示制造商和零售商的动态演化策略。

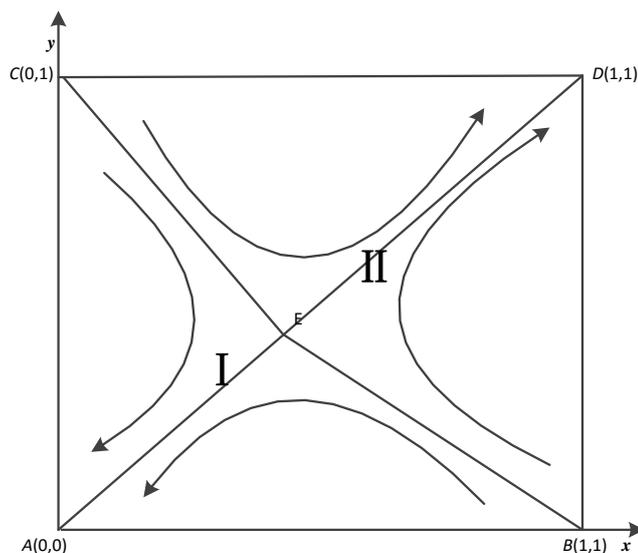


图 1 制造商和零售商演化策略

2.2 演化博弈稳定性分析

根据图 1，分析演化博弈的稳定性。演化博弈最终的稳定状态取决于初始的策略组合。如果初始的策略组合落在区域 I，则最终的稳定策略为（不合作，不合作），如果初始的策略组合落在区域 II，则最终的稳定策略为（合作，合作）。区域 I 和区域 II 的面积直接决定了最终的稳定策略，制造商与零售商合作的概率的大小即分析区域大小 I，供应链演化博弈均衡合作概率有以下性质：

性质 1. 制造商与零售商合作的概率随着零售商调整策略成本的增加而减少。

$\frac{\partial S_1}{\partial U} > 0$ ， S_1 是 U 的单调递增函数，当零售商面对制造商不合作决策时，调整策略付出的成本越高，区域 I 的面积越大，即制造商和零售商选择不合作的概率越大，即制造商和零售商选择（不合作，不合作）策略的概率越大。

性质 2. 制造商和零售商合作的概率随着集中决策的超额利润的增加而增加。

$\frac{\partial S_1}{\partial V} < 0$ ， S_1 是 V 的单调递减函数，随着制造商和零售商集中决策收益增多，区域 I 的面积变小，即制造商和零售商选择不合作的概率越小，制造商和零售商选择（合作，合作）决策的概率越大。

性质 3. 制造商和零售商合作的概率随着零售商的违约收益的增加而减少。

$\frac{\partial S_1}{\partial E_1} > 0$ ， S_1 是 E_1 的单调递增函数，当违约收益增加时， S_1 的面积增加，制造商和零售商合作的概率减少。

性质 4. 制造商和零售商合作的概率随着制造商的违约损失的增加而减少。

$\frac{\partial S_1}{\partial E_2} > 0$ ， S_1 是 E_2 的单调递增函数，当制造商的违约损失增加时， S_1 的面积增加，制造商和零售商合作的概率减小

性质 5. 当其它影响因素恒定时，存在一个超额利润分配比例，使得制造商和零售商合作概率最大。

证明：求 S_1 关于超额利润分配比例 α 的偏导，可得

$$\frac{\partial S_1}{\partial \alpha} = \frac{V}{2} \left(\frac{U}{[(1-\alpha)V - E_1 + U]^2} - \frac{E_2}{(\alpha V - E_2)^2} \right) = 0$$

$$\frac{\partial^2 S_1}{\partial \alpha^2} = \frac{UV^2}{[(1-\alpha)V - E_1 + U]^3} + \frac{E_2 V^2}{(\alpha V - E_2)^3} > 0$$

存在最优 α_0 使得 S_1 的一阶导数等于零，二阶导数大于零，此时 S_1 取得极小值也是最小值，即制造商和零售商合作的进化稳定策略是集中决策的概率最大。

3 契约惩罚机制

通过以上分析，制造商和零售商在长期演化博弈中，难以实现最优的均衡状态，供应链仅有一定的概率实现整体利润最大化，浪费了社会资源。通过分析可知，供应链参与者想要实现最大限度合作策略，仅仅依赖双方的自发演化是难以做到，需要考虑一个合理的机制来促进双方合作。在此，假设制造商和零售商在生产产品之初，签订一个契约。在该契约下，如果一方采取合作策略，而另一方采用不合作策略，则不合作的一方需要向合作的一方支付

H ，在契约作用下，制造商和零售商的支付矩阵如表 3 所示。

表 3 契约下制造商和零售商的支付矩阵

	合作	不合作
合作	$\pi_M^N + \alpha V, \pi_R^N + (1 - \alpha)V$	$\pi_R^N - E_2 + H, \pi_M^N + E_1 - H$
不合作	$\pi_M^N - H, \pi_R^N - U + H$	π_M^N, π_R^N

由表 3 可得，此时制造商的复制动态方程为

$$\frac{dx}{dt} = x(1-x)[(\alpha V + E_2)y - E_2 + H]$$

零售商的复制动态方程为

$$\frac{dy}{dt} = (1-y)y[((1-\alpha)V - E_1 + U)x - U + H]$$

当 $H > U$ 且 $H > E_2$ 时，平面 S 上存在四个平衡点 $(0,0), (0,1), (1,0), (1,1)$ ，其中 $(0,0)$ 是不稳定点， $(0,1)$ 和 $(1,0)$ 是鞍点 ESS，最终的进化稳定点是 $(1,1)$ 。图 2 表示有奖惩机制时，制造商和零售商的动态演化策略。

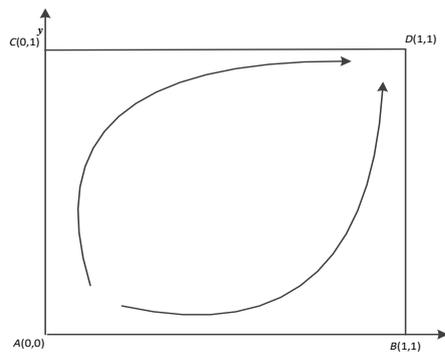


图 2 带有奖惩机制的策略动态演化

由图 2 可知，当制造商和零售商签订契约，一方选择不合作，将支付 H 的违约惩罚，选择合作的一方收获 H 的奖励，且当 $H > U$ ， $H > E_2$ ，即选择不合作的一方支付的罚金属以补偿选择合作方的成本时，供应链的进化稳定点为 $(1,1)$ ，制造商和零售商最终选择（合作，合作）的策略。逐步实现供应链的最优决策，达到效率最大化。

4 结论

通过研究由单一制造商和零售商构成的两级供应链，在质量和价格依赖线性需求条件下分析非理性供应链参与方最优决策的选择过程。分析了供应链集中决策超额收益、零售商策略调整成本和违约收益因素对于供应链策略选择的影响。分析发现，制造商和零售商合作概率随着集中决策的超额利润的增加而增加，随着制造商违约损失的增加而减少，但随零售商违约收益的增加而减少；存在一个超额利润分配比例使得制造商和零售商合作概率最大。此外，在一定范围内，供应链参与方合作概率随市场需求价格弹性的增加而降低，随质量弹性增加而增加；当采用合理奖励惩罚的契约机制时，供应链参与方将向最有效率的方向演化，实现长期的合作。

参考文献

- [1] Corbett C J, De Groot X. A supplier's optimal quantity discount policy under asymmetric information[J]. Management science, 2000, 46(3): 444-45
- [2] Qi X, Bard J F, Yu G. Supply chain coordination with demand disruptions[J]. Omega, 2004, 32(4): 301-312.
- [3] 肖迪, 袁敬霞, 包兴. 质量与价格双重竞争情景下的供应链协调策略分析[J]. 中国管理科学, 2013, 21(004): 82-88.
- [4] 鲁其辉, 朱道立. 质量与价格竞争供应链的均衡与协调策略研究[J]. 管理科学学报, 2009, 12(3): 56-64
- [5] 曹东, 杨春节. 考虑质量失误的供应链博弈模型研究[J]. 中国管理科学, 2006, 14(1): 25-29.
- [6] Xiao T, Yu G. Supply chain disruption management and evolutionarily stable strategies of retailers in the quantity-setting duopoly situation with homogeneous goods[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 173(2): 648-668.
- [7] 谢识予. 经济博弈论[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2002
- [8] Weibull J W. Evolutionary game theory[M]. MIT press, 1997.
- [9] 黄敏镁. 基于演化博弈的供应链协同产品开发合作机制研究[J]. 中国管理科学, 2010, 18(6): 155-162.
- [10] Tian Y, Govindan K, Zhu Q. A system dynamics model based on evolutionary game theory for green supply chain management diffusion among Chinese manufacturers[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 80: 96-105.

The Evolution in a Two-Echelon Supply Chain with Quality and Price Dependent Demand

Yang Honglin, Zhou Chao

(School of Business Administration, Changsha, Hunan 410082)

Abstract: We consider a two-echelon supply chain consisting of a single manufacturer and a single retailer who are both limited rationality. We propose a game model in which the demand is linear sensitive to quality and retail price. We analyze the equilibrium evolution of two players' decisions and income sharing. We find that the cooperation probability between both players would always decrease with the retailer's cost that adjust its strategy while increase with the default and excess returns. Moreover, there exists an optimal partition ratio in the excess profit maximizing the cooperation probability.

Keywords: quality and price dependent; evolutionary game; cooperation probability; income sharing

作者简介(可选):杨宏林(1971-), 男, 汉族, 湖南娄底人, 副教授, 博士生导师, 研究方向为投融资决策与风险管理、供应链金融; 周超(1992-), 男, 汉族, 湖北荆州人, 硕士研究生, 研究方向为供应链金融。