

考虑保鲜努力的生鲜农产品供应链价值共创演化博弈分析

王艺桦, 张晓林*

天津农学院经济管理学院, 天津

收稿日期: 2024年1月29日; 录用日期: 2024年3月22日; 发布日期: 2024年3月29日

摘要

本文基于演化博弈和价值共创理论, 针对生鲜农产品供应链成员是否合作投入保鲜努力构建演化博弈模型, 并引入惩罚机制, 探究不同影响因素作用条件下供应链价值共创的演化结果。研究表明, 只有当选择合作投入保鲜努力所获利润均高于其搭便车利润时, 供应链成员才有可能都选择“投入保鲜努力”策略, 实现价值共创。在价值共创过程中, 应通过设置合理收益分配和成本分担机制、适当的奖惩机制等措施来促进合作, 提升生鲜农产品供应链价值共创水平。

关键词

生鲜农产品供应链, 保鲜努力, 价值共创, 演化博弈

The Evolutionary Game Analysis of Value Co-Creation in Fresh Agricultural Products Supply Chain Considering Whether to Invest in Freshness-Keeping Effort

Yihua Wang, Xiaolin Zhang*

College of Economics and Management, Tianjin Agricultural University, Tianjin

Received: Jan. 29th, 2024; accepted: Mar. 22nd, 2024; published: Mar. 29th, 2024

*通讯作者。

Abstract

Based on the theory of evolutionary game and value co-creation, this paper constructs an evolutionary game model aiming at whether the members of fresh agricultural products supply chain cooperate in freshness-keeping effort, and introduces the punishment mechanism to explore the evolutionary results of value co-creation under different influence factors. The study shows that only when the profits of choosing cooperation to invest in freshness-keeping efforts are higher than those of free hiking, can the members of the supply chain all choose the strategy of “investing in freshness-keeping efforts” to realize value co-creation. In the process of value co-creation, these measures should be put up to promote cooperation in order to enhance the level of value co-creation of fresh agricultural products supply chain including reasonable income distribution and cost sharing mechanism, and appropriate reward and punishment mechanism.

Keywords

Fresh Agricultural Products Supply Chain, Freshness-Keeping Effort, Value Co-Creation, Evolutionary Game

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

生鲜农产品是人们主要的食物营养来源, 在日常生活消费中占据十分重要地位。随着人民生活水平的提高和消费需求结构的不断升级, 对生鲜农产品供给提出了更高要求。保鲜努力投入即供应链成员所付出的用于维持农产品新鲜程度的资源[1], 对于实现价值共创、提升供应链绩效具有重要作用, 应从供应链整体出发, 激励引导供应链成员共同投入保鲜努力, 实现共创共赢。“农超对接”已成为我国农产品流通的重要模式, 通过农民合作社与超市的直接对接减少流通环节, 实现产销的高效衔接, 提高流通效率, 降低流通成本。基于博弈方法研究“农超对接”模式下供应链保鲜努力投入与价值共创问题, 对于提升供应链价值创造能力、实现供需的高质量对接具有重要意义。

如何提升和保障农产品新鲜度, 为消费者提供更加新鲜健康的农产品, 是供应链的价值创造能力及竞争力的重要体现。生鲜农产品具有鲜活性、易腐性、时效性等流通特点, 对温度湿度极为敏感, 对运输条件的要求较高, 保鲜投入是影响农产品新鲜度和产销高质量对接的重要因素。因此, 是否投入保鲜努力成为供应链主体能否有效实现价值共创的关键。随着消费者对农产品新鲜度要求的不断提高, 生鲜农产品供应链研究中对于保鲜努力的讨论日益增多。王苗苗等[2]认为消费者对生鲜农产品的关注除了价格外更重要的是新鲜度和品质, 并提出生鲜农产品供应链必须投入保鲜努力以提高其经营策略。曹晓宁等[3]基于新鲜度与保鲜努力水平之间的关系, 研究生鲜农产品与双渠道供应商的保鲜努力投入、定价与协调策略。从农超对接角度出发, 周涛等[4]设计无主体、合作社及超市三种保鲜努力投入情形, 比较不同保鲜努力水平投入对供应链绩效的影响, 探讨集中和分散决策下的契约协调策略。史保阳、史保莉[5]针对农超对接利益协调问题, 引入新鲜度函数和数量完好率指标, 通过分析不同决策下保鲜努力水平与最优定价, 研究收益共享契约对供应链的协调作用。魏杰、姜云超[6]通过建立生鲜电商在转售、代理和混合模式下的不同博弈模型, 研究在供应商的不同保鲜努力下销售商的最优销售模式。除此之外, 在生

鲜农产品供应链运行过程中往往会因为缺乏合理的激励机制而产生“搭便车”行为。李昌兵等[7]通过对冷链物流资源投入水平的分析认为,“搭便车”行为所产生的额外收益会阻碍供应链投入冷链物流资源的积极性。杨松等[8]通过建立惩罚机制下的博弈模型,得到农产品在质量安全投入方面的演化稳定策略,对完善供应链激励机制具有重要的启示意义。因此,基于价值共创理念整合优势资源,合作投入保鲜努力是减少农产品损耗、提升供应链整体绩效的有效方法。

文献梳理可知,当前研究多通过建立不同场景下的 Stackellberg 博弈模型分析保鲜努力投入策略,但如何通过激励机制来有效解决供应链成员之间的“搭便车”行为,使其共同投入保鲜努力进而实现价值共创,也是需要研究的重要问题。基于此,本文结合价值共创理论,基于农超对接模式,构建生鲜农产品供应链保鲜努力投入的演化博弈模型,针对成员之间是否投入保鲜努力来探讨不同情形下的演化状态,并针对“搭便车”行为引入惩罚机制,分析不同影响因素对演化路径的影响,以期为生鲜农产品供应链价值共创提供更多理论与实践支持。

2. 问题描述与模型构建

减少流通环节、优化供应链条,实现农民、销售商、消费者共赢,是农产品流通变革的重要内容。目前,产地直供、农超对接等已成为联通生产与消费,联结小农户与大市场的重要流通模式。如何提升和保障农产品新鲜度,为消费者提供更加新鲜健康的农产品,是供应链的价值创造能力及竞争力的重要体现。考虑以农民合作社为代表的生产商(A)和以生鲜超市为代表的零售商(B)构成的供应链,保鲜努力投入会影响生鲜农产品新鲜度,不同的新鲜度和质量下消费者的体验不同,一方面供应链需要与顾客互动,了解消费者需求,提升保鲜水平,另一方面生产商和零售商基于自身利益最大化,均面临投入保鲜努力和投入保鲜努力的决策问题,从而存在不同的策略组合,由于各主体的决策并非同时做出且参与人可根据对方的行为对自身决策进行调整,因此参与主体将会在博弈过程中不断演化进步,最终达到稳定状态。针对该模型提出如下假设:

假设 1: 双方不投入保鲜努力来实现价值共创时获得的基础收益分别为 p_1 和 p_2 , 这部分收益不随其是否选择投入而发生变化。

假设 2: 若双方达成合作来共同投入保鲜努力时,保鲜努力成果可从农产品销售给消费者时的新鲜度体现,农产品新鲜度变化与所投入的保鲜努力程度及保鲜努力程度对新鲜度的影响有关[9],可将农产品新鲜度变化函数设为: $u = u_0 + km$, 其 u 为农产品送达消费者时的新鲜度, u_0 为供应链不投入保鲜努力状态下农产品送达消费者手中时的新鲜度, k 为保鲜努力水平对新鲜度的影响。

假设 3: 投入保鲜努力下,消费者对于更新鲜的农产品愿意付出更高的价格,供应链可获得高于基础收益之和的超额收益 p 。设超额收益 p 与农产品新鲜度 u 及保鲜努力水平 m 的关系为:

$p = qu = q(u_0 + km)$, 其中 q 为消费者对农产品新鲜度的敏感系数,按照双方的约定比例来进行超额收益 p 的分配,生产商的分配比例为 a ($0 < a < 1$), 则销售商的分配比例为 $1 - a$ 。

假设 4: 由于共同投入保鲜努力时需要付出新技术、新设备等投入,由此产生的保鲜努力成本为 c , 设生鲜农产品供应链的保鲜努力水平为 m ($m > 0$), 节点保鲜努力对保鲜成本的影响系数为 n ($0 < n < 1$), 保鲜投入成本是保鲜努力水平的二次函数[5],可设保鲜努力成本为 $c = \frac{nm^2}{2}$, 成本分担比例由双方协定,分别为 b ($0 < b < 1$)和 $1 - b$ 。

假设 5: 若有一方选择投入保鲜努力时,另一方无论是否选择投入保鲜努力,选择投入的节点都需付出相对应的成本 $\frac{bnm^2}{2}$ 或 $\frac{n(1-b)m^2}{2}$, 同时也会获得更多收益,设生产商、零售商单独投入保鲜努力时的收益分别为 r_1 和 r_2 , 但由于整个供应链并没有完全合作实现价值共创,各自单独投入保鲜努力所获的

收益不足以弥补成本, 即 $r_1 < \frac{bnm^2}{2}$, $r_2 < \frac{(1-b)nm^2}{2}$ 。

假设 6: 在假设 5 的条件下, 未选择投入保鲜努力的一方会因为搭便车而享受到生鲜农产品保鲜程度提高所带来的额外收益分别为 e_1 , e_2 。

假设 7: 为防止因搭便车而影响双方合作投入保鲜努力, 引入惩罚机制, 设不投入保鲜努力的一方需缴纳罚金 f , 所缴纳的罚金将由投入保鲜努力的一方获得。

假设 8: 设生产商选择“投入保鲜努力”的概率为 x ($0 < x < 1$), 则选择“不投入保鲜努力”的概率为 $1-x$; 零售商选择“投入保鲜努力”的概率为 y ($0 < y < 1$), 则选择“不投入保鲜努力”的概率为 $1-y$ 。

由此可构建收益矩阵, 如表 1 所示。

Table 1. Income matrix

表 1. 收益矩阵

		参与人 B	
		投入保鲜努力	不投入保鲜努力
参与人 A	投入保鲜努力	$p_1 + aq(u_0 + km) - \frac{bnm^2}{2}$, $p_2 + (1-a)q(u_0 + km) - \frac{(1-b)nm^2}{2}$	$p_1 + r_1 - \frac{bnm^2}{2}$, $p_2 + e_2$
	不投入保鲜努力	$p_1 + e_1$, $p_2 + r_2 - \frac{(1-b)nm^2}{2}$	p_1 , p_2

参与人 A 选择投入保鲜努力、不投入保鲜努力的期望收益 E_{A1} 、 E_{A2} 和平均期望收益 E_A 分别为:

$$E_{A1} = y \left[p_1 + aq(u_0 + km) - \frac{bnm^2}{2} \right] + (1-y) \left(p_1 + r_1 - \frac{bnm^2}{2} \right) \tag{1}$$

$$E_{A2} = y(p_1 + e_1) + (1-y)p_1 \tag{2}$$

$$E_A = xE_{A1} + (1-x)E_{A2} \tag{3}$$

根据 Malthusian 原理可得复制动态方程为:

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(E_{A1} - E_A) = x(1-x) \left\{ y \left[aq(u_0 + km) - e_1 - r_1 \right] + r_1 - \frac{bnm^2}{2} \right\} \tag{4}$$

参与人 B 选择投入保鲜努力、不投入保鲜努力的期望收益 E_{B1} 、 E_{B2} 和平均期望收益 E_B 分别为:

$$E_{B1} = x \left[p_2 + (1-a)q(u_0 + km) - \frac{(1-b)nm^2}{2} \right] + (1-x) \left[p_2 + r_2 - \frac{(1-b)nm^2}{2} \right] \tag{5}$$

$$E_{B2} = x(p_2 + e_2) + (1-x)p_2 \tag{6}$$

$$E_B = yE_{B1} + (1-y)E_{B2} \tag{7}$$

根据 Malthusian 原理可得复制动态方程为:

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(E_{B1} - E_B) = y(1-y) \left\{ x \left[(1-a)q(u_0 + km) - e_2 - r_2 \right] + r_2 - \frac{(1-b)nm^2}{2} \right\} \tag{8}$$

联立 $F(x)$ 和 $F(y)$ 得复制动态方程组, 并令 $F(x)=0$ 、 $F(y)=0$, 可得演化博弈的五个均衡点:

$O(0,0)$ 、 $A(1,0)$ 、 $B(0,1)$ 、 $C(1,1)$ 、 $D(x^*,y^*)$, 其中 $x^* = \frac{r_2 - \frac{(1-b)nm^2}{2}}{e_2 + r_2 - (1-a)q(u_0 + km)}$

$$y^* = \frac{r_1 - \frac{bnm^2}{2}}{e_1 + r_1 - aq(u_0 + km)}。$$

由 Friedman 方法可知, 演化博弈中均衡点的稳定性可根据雅可比矩阵来判断, 对上述复制动态方程依次求 x, y 的偏导数, 可得雅可比矩阵如下[10]:

$$J = \begin{bmatrix} (2x-1)\left[\frac{bnm^2}{2} - r_1 + y(e_1 + r_1 - aq(u_0 + km))\right] & x(x-1)(e_1 + r_1 - aq(u_0 + km)) \\ y(y-1)[e_2 + r_2 - (1-a)q(u_0 + km)] & (2y-1)\left\{x[e_2 + r_2 - (1-a)q(u_0 + km)] - r_2 + \frac{(1-b)nm^2}{2}\right\} \end{bmatrix}$$

根据 Friedman 方法的判定准则, 若均衡点处的雅可比矩阵满足 $trJ < 0, \det J > 0$, 则该均衡点就是局部渐进平衡点, 是演化博弈的稳定策略, 即 ESS。各均衡点的稳定性, 如表 2 所示, 演化相位如图 1 所示。

Table 2. Stability analysis of equilibrium points

表 2. 均衡点稳定性分析

	情形 1			情形 2			情形 3			情形 4		
	trJ	detJ	稳定性	trJ	detJ	稳定性	trJ	detJ	稳定性	trJ	detJ	稳定性
$(0, 0)$	-	+	ESS	-	+	ESS	-	+	ESS	-	+	ESS
$(1, 0)$?	-	鞍点	+	+	不稳定	?	-	鞍点	+	+	不稳定
$(0, 1)$?	-	鞍点	?	-	鞍点	+	+	不稳定	+	+	不稳定
$(1, 1)$	+	+	不稳定	?	-	鞍点	?	-	鞍点	-	+	ESS
(x^*, y^*)										0	-	鞍点

情形 1: 考虑 $\left[aq(u_0 + km) - \frac{bnm^2}{2} \right] < e_1$ 且 $\left[(1-a)q(u_0 + km) - \frac{(1-b)nm^2}{2} \right] < e_2$, 即双方选择投入保鲜

努力时各自的利润均小于不投入时的搭便车利润, 这种情形下由于生鲜农产品供应链投入保鲜努力的成本较高或消费者对于新鲜度的敏感系数较低等原因, 选择投入保鲜努力所获收益不如搭便车收益。此时 $O(0,0)$ 为唯一稳定点, 由于利润更大双方都更倾向于选择搭便车获取更多利润而放弃保鲜努力的投入, 无法实现价值共创。由情形 1 可知, 此时双方经过演化博弈最终稳定在 $O(0,0)$, 最终策略选择为(不投入保鲜努力, 不投入保鲜努力)。

情形 2: 考虑 $\left[aq(u_0 + km) - \frac{bnm^2}{2} \right] > e_1$ 且 $\left[(1-a)q(u_0 + km) - \frac{(1-b)nm^2}{2} \right] < e_2$, 即参与人 A 的搭便车

利润低于双方合作投入保鲜努力时的利润, 参与人 B 的搭便车利润高于双方合作投入保鲜努力时的利润, 这种情形下参与人 A 通过改进保鲜努力技术、优化合作策略等方式降低保鲜努力成本, 选择投入保鲜努力所获收益提高大于搭便车收益, 而参与人 B 投入保鲜努力的收益未提高, 仍然低于搭便车收益。此时 $O(0,0)$ 为唯一稳定点, 基于各自的利益考虑, 参与人 A 更倾向于与参与人 B 合作投入保鲜努力实现价值共创, 以获得更高收益, 而参与人 B 倾向于不参与合作, 由情形 2 可知双方最终趋向于稳定点 $O(0,0)$, 最终策略选择为(不投入保鲜努力, 不投入保鲜努力)。

情形 3: 考虑 $\left[aq(u_0 + km) - \frac{bnm^2}{2} \right] < e_1$ 且 $\left[(1-a)q(u_0 + km) - \frac{(1-b)nm^2}{2} \right] > e_2$, 参与人 A 的搭便车利

润高于投入保鲜努力时的利润, 参与人 B 的搭便车利润低于投入保鲜努力时的利润, 这种情形下参与人 B 通过改进保鲜努力技术、优化合作策略等方式降低保鲜努力成本, 选择投入保鲜努力所获收益提高大于搭便车收益, 而参与人 A 投入保鲜努力的收益未提高, 仍然低于搭便车收益。此时 $O(0,0)$ 为唯一稳定点, 此情形下基于各自利润考虑, 参与人 B 更倾向于与参与人 A 合作投入保鲜努力, 实现价值共创, 而参与人 A 则倾向于不参与合作, 由情形 3 可知双方最终趋向于稳定点 $O(0,0)$, 最终策略选择为(不投入保鲜努力, 不投入保鲜努力)。

情形 4: 考虑 $\left[aq(u_0 + km) - \frac{bnm^2}{2} \right] > e_1$ 且 $\left[(1-a)q(u_0 + km) - \frac{(1-b)nm^2}{2} \right] > e_2$, 即双方选择合作投入

保鲜努力实现价值共创时的利润均高于搭便车时的利润, 这种情形下参与人 A、B 选择合作投入保鲜努力, 各自选择投入保鲜努力所获收益大于搭便车收益, 演化相位如情形 4 所示。有 $O(0,0)$ 和 $C(1,1)$ 两个稳定点, 此情形下有两种演化路径, 一是从不稳定点 $A(1,0)$ 、 $B(0,1)$ 出发, 沿着鞍点 D 向左下演化, 最终趋向于稳定点 $O(0,0)$, 此时, 最终策略选择为(不投入保鲜努力, 不投入保鲜努力); 二是从不稳定点 $A(1,0)$ 、 $B(0,1)$ 出发, 沿着鞍点 D 向右上演化, 最终趋向于稳定点 $C(1,1)$, 此时, 最终策略选择为(投入保鲜努力, 投入保鲜努力)。

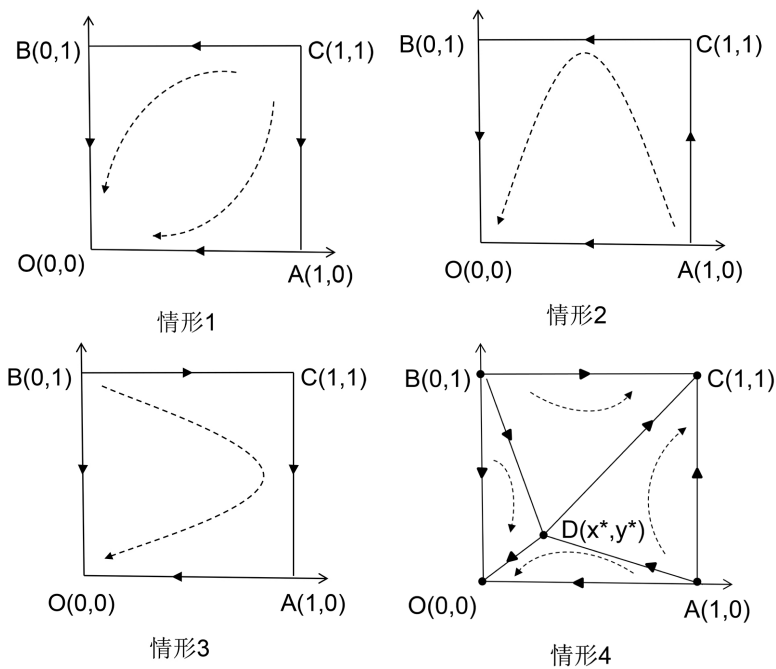


Figure 1. Evolution phase diagram under different conditions

图 1. 不同情形下演化相位图

3. 参数影响分析

上述分析表明, 只有双方选择合作投入保鲜努力时的利润均高于其搭便车时的利润时, 供应链上参与主体才有可能都选择“投入保鲜努力”策略, 但最终演化结果还要考虑演化博弈的收益矩阵和初始状态。具体演化为哪种状态由情形 4 中四边形 $OADB$ 和四边形 $CADB$ 的面积决定, 令两者面积分别为 S_1 、

S_2 , 当 $S_1 > S_2$ 时, 双方最终趋向于稳定点 $O(0,0)$, 选择(不投入保鲜努力, 不投入保鲜努力)的概率高; 当 $S_1 < S_2$ 时, 双方最终趋向于稳定点 $C(1,1)$, 选择(投入保鲜努力, 投入保鲜努力)的概率高; 当 $S_1 = S_2$ 时, 双方趋向于稳定点 $O(0,0)$ 和稳定点 $C(1,1)$ 的概率相等, 选择(投入保鲜努力, 投入保鲜努力)与(不投入保鲜努力, 不投入保鲜努力)的概率相等。

以 S_1 为例分析不同参数的变化对演化结果的影响:

$$S_1 = S_{OAD} + S_{OBD} = \frac{1}{2} \left[\frac{r_2 - \frac{(1-b)nm^2}{2}}{e_2 + r_2 - (1-a)q(u_0 + km)} + \frac{r_1 - \frac{bnm^2}{2}}{e_1 + r_1 - aq(u_0 + km)} \right] \quad (9)$$

由公式(9)可知, 供应链节点双方最终选择(不投入保鲜努力, 不投入保鲜努力)的概率即 S_1 的大小由 $a, b, m, n, q, k, e_1, e_2, r_1, r_2$ 共同决定。

Table 3. Effects of parameter changes on evolutionary paths

表 3. 参数变化对演化路径的影响

参数	偏导数符号	对 S_1 的影响	参数变化的影响
$a \uparrow$	$\frac{\partial S_1}{\partial a}$ 符号不确定, $\frac{\partial^2 S_1}{\partial a^2} > 0$	先减小, 后增大	存在特定的 a^* 值, 使双方选择向“投入保鲜努力”方向演化的意愿达到最大
$b \uparrow$	$e_1 + r_1 - ap < e_2 + r_2 - (1-a)p$ 时, $\frac{\partial S_1}{\partial b} < 0$	$S_1 \downarrow$	促进双方选择向“投入保鲜努力”方向演化
	$e_1 + r_1 - ap > e_2 + r_2 - (1-a)p$ 时, $\frac{\partial S_1}{\partial b} > 0$	$S_1 \uparrow$	阻碍双方选择向“投入保鲜努力”方向演化
$n \uparrow$	$\frac{\partial S_1}{\partial n} > 0$	$S_1 \uparrow$	阻碍双方选择向“投入保鲜努力”方向演化
$q \uparrow$	$\frac{\partial S_1}{\partial q} < 0$	$S_1 \downarrow$	促进双方选择向“投入保鲜努力”方向演化
$m \uparrow$	$\frac{\partial S_1}{\partial m} > 0$	$S_1 \uparrow$	阻碍双方选择向“投入保鲜努力”方向演化
$k \uparrow$	$\frac{\partial S_1}{\partial k} < 0$	$S_1 \downarrow$	促进双方选择向“投入保鲜努力”方向演化
$e_1, e_2 \uparrow$	$\frac{\partial S_1}{\partial e_1} > 0, \frac{\partial S_1}{\partial e_2} > 0$	$S_1 \uparrow$	阻碍双方选择向“投入保鲜努力”方向演化
$r_1, r_2 \uparrow$	$\frac{\partial S_1}{\partial r_1} < 0, \frac{\partial S_1}{\partial r_2} < 0$	$S_1 \downarrow$	促进双方选择向“投入保鲜努力”方向演化

由表 3 可知, 当超额收益分配比例 a 增大时, 供应链倾向于向“投入保鲜努力”方向演化, 但存在特定的 a^* 值, 此时双方“投入保鲜努力”的概率达到最大; 由 $\frac{\partial S_1}{\partial b} = \frac{-nbm^2}{4(e_1 + r_1 - ap)} + \frac{nbm^2}{4[e_2 + r_2 - (1-a)p]}$ 可

知, 当 $e_1 + r_1 - aq(u_0 + km) < e_2 + r_2 - (1-a)q(u_0 + km)$ 时, $\frac{\partial S_1}{\partial b} < 0$, b 增大促进向“投入保鲜努力”方向演化, 当 $e_1 + r_1 - aq(u_0 + km) > e_2 + r_2 - (1-a)q(u_0 + km)$ 时, $\frac{\partial S_1}{\partial b} > 0$, b 增大将阻碍向“投入保鲜努力”

方向演化; S_1 是 m, n, e 的增函数, 即保鲜努力水平、保鲜努力水平对成本的影响系数及搭便车收益越大, 供应链主体越倾向于向“不投入保鲜努力”方向演化; S_1 是 k, q, r 的减函数, 即保鲜努力水平对新鲜度的影响、消费者对农产品新鲜度的敏感系数以及参与主体单独投入保鲜努力时的收益越大, 供应

链主体越倾向于向“投入保鲜努力”方向演化。为此, 供应链在协调资源、规划保鲜努力投入时要积极探索降低阻碍因素影响的解决路径, 促进合作达成, 实现共赢。

4. 引入惩罚机制下的演化博弈

4.1. 惩罚机制下的演化均衡分析

由上述分析可知, 农产品供应链在是否合作投入保鲜努力实现价值共创过程中存在诸多影响因素, 使得各节点之间达成合作的概率不定。在没有约束条件的情况下参与成员可能会采取机会主义行为, 一旦搭便车收益高于其在价值共创中获得的收益, 该成员便会选择搭便车, 从而导致价值共创合作关系受损甚至破裂, 因此有必要考虑引入惩罚机制来规范成员行为。当双方中一方选择“投入保鲜努力”, 另一方选择“不投入保鲜努力”时, 选择不投入的一方需缴纳相应的罚金 f ($f > 0$), 并将作为补偿金给予选择投入保鲜努力的一方, 此时参与博弈双方的收益矩阵如表 4 所示。

Table 4. Income matrix under penalty mechanism

表 4. 惩罚机制下的收益矩阵

		参与人 B	
		投入保鲜努力	不投入保鲜努力
参与人 A	投入保鲜努力	$p_1 + aq(u_0 + km) - \frac{bnm^2}{2}, p_2 + (1-a)q(u_0 + km) - \frac{(1-b)nm^2}{2}$	$p_1 + r_1 + f - \frac{bnm^2}{2}, p_2 + e_2 - f$
	不投入保鲜努力	$p_1 + e_1 - f, p_2 + r_2 + f - \frac{(1-b)nm^2}{2}$	p_1, p_2

参与人 A 选择参与价值共创、不参与价值共创的期望收益 E_{Af1} 、 E_{Af2} 和平均期望收益 E_{Af} 分别为:

$$E_{Af1} = y \left[p_1 + aq(u_0 + km) - \frac{bnm^2}{2} \right] + (1-y) \left(p_1 + r_1 + f - \frac{bnm^2}{2} \right) \quad (10)$$

$$E_{Af2} = y(p_1 + e_1 - f) + (1-y)p_1 \quad (11)$$

$$E_{Af} = xE_{Af1} + (1-x)E_{Af2} \quad (12)$$

其复制动态方程为:

$$F'(x) = \frac{dx}{dt} = x(E_{Af1} - E_{Af}) = x(1-x) \left\{ f + r_1 - \frac{bnm^2}{2} - y[e_1 + r_1 - aq(u_0 + km)] \right\} \quad (13)$$

参与人 B 选择参与价值共创、不参与价值共创的期望收益 E_{Bf1} 、 E_{Bf2} 和平均期望收益 E_{Bf} 分别为:

$$E_{Bf1} = x \left[p_2 + (1-a)q(u_0 + km) - \frac{(1-b)nm^2}{2} \right] + (1-x) \left[p_2 + r_2 + f - \frac{(1-b)nm^2}{2} \right] \quad (14)$$

$$E_{Bf2} = x(p_2 + e_2 - f) + (1-x)p_2 \quad (15)$$

$$E_{Bf} = yE_{Bf1} + (1-y)E_{Bf2} \quad (16)$$

其复制动态方程为:

$$F'(y) = \frac{dy}{dt} = y(E_{Bf1} - E_{Bf}) = y(1-y) \left\{ f + r_2 - \frac{(1-b)nm^2}{2} - x[e_2 + r_2 - (1-a)q(u_0 + km)] \right\} \quad (17)$$

联立 $F'(x)$ 和 $F'(y)$ 可得复制动态方程组, 令 $F'(x)=0$ 、 $F'(y)=0$, 可得演化博弈的五个均衡点:

$$O'(0,0)、A'(1,0)、B'(0,1)、C'(1,1)、D'(x^{**},y^{**}), \text{ 其中 } x^{**} = \frac{f+r_2 - \frac{(1-b)nm^2}{2}}{e_2+r_2-(1-a)q(u_0+km)},$$

$$y^{**} = \frac{f+r_1 - \frac{bnm^2}{2}}{e_1+r_1-aq(u_0+km)}。$$

惩罚机制下的均衡点稳定性分析如表 5 所示, 将各主体单独投入保鲜努力产生的损失与罚金进行比较可知, 引入惩罚机制后各主体都倾向于向“投入保鲜努力”方向演化, 并且只要出现任意一方的单独投入保鲜努力的损失小于罚金数额, 双方演化的终点必然是(投入保鲜努力, 投入保鲜努力), 四种情形下演化相位如图 2 所示。

Table 5. Stability analysis of equilibrium points under penalty mechanism

表 5. 惩罚机制下均衡点稳定性分析

	情形 1			情形 2			情形 3			情形 4		
	$\frac{bnm^2}{2} - r_1 > f$ 且			$\frac{bnm^2}{2} - r_1 > f$ 且			$\frac{bnm^2}{2} - r_1 < f$ 且			$\frac{bnm^2}{2} - r_1 < f$ 且		
	$\frac{(1-b)nm^2}{2} - r_2 > f$			$\frac{(1-b)nm^2}{2} - r_2 < f$			$\frac{(1-b)nm^2}{2} - r_2 < f$			$\frac{(1-b)nm^2}{2} - r_2 > f$		
	trJ	detJ	稳定性	trJ	detJ	稳定性	trJ	detJ	稳定性	trJ	detJ	稳定性
(0, 0)	-	+	ESS	?	-	鞍点	+	+	不稳定	?	-	鞍点
(1, 0)	+	+	不稳定	+	+	不稳定	+	-	鞍点	+	-	鞍点
(0, 1)	+	+	不稳定	+	-	鞍点	+	-	鞍点	+	+	不稳定
(1, 1)	-	+	ESS	-	+	ESS	-	+	ESS	-	+	ESS
(x^{**}, y^{**})	0	-	鞍点									

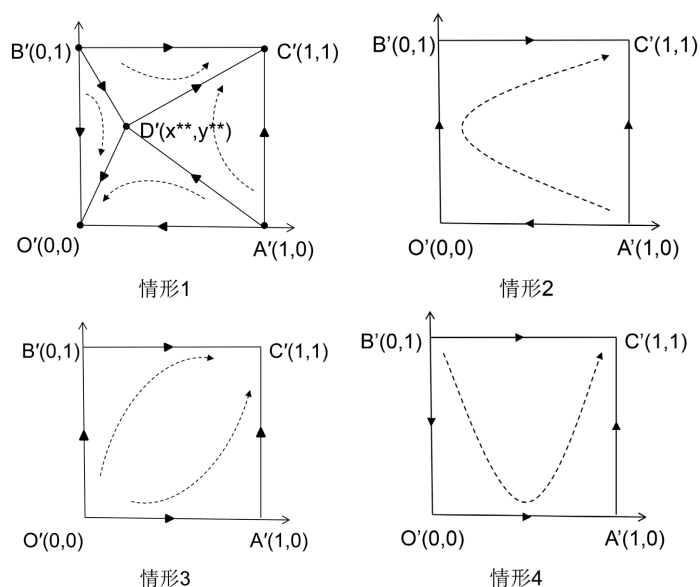


Figure 2. Evolution phase diagram of the four cases under the punishment mechanism

图 2. 惩罚机制下四种情况的演化相位图

4.2. 罚金 f 的分析

与前述分析类似, 考虑惩罚机制的情况下, 将各主体单独投入保鲜努力产生的损失与罚金数值进行比较, 情形 1 当 $\frac{bnm^2}{2} - r_1 > f$ 且 $\frac{(1-b)nm^2}{2} - r_2 > f$ 时, 双方的最终策略可能是都“投入保鲜努力”或都“不投入保鲜努力”, 具体演化为哪种状态由图 2 中四边形 $O'A'D'B'$ 和四边形 $C'A'D'B'$ 的面积决定, 令两者面积分别为 S'_1 、 S'_2 , 当 $S'_1 > S'_2$ 时, 双方最终趋向于稳定点 $O'(0,0)$, 选择(不投入保鲜努力, 不投入保鲜努力)的概率高; 当 $S'_1 < S'_2$ 时, 双方最终趋向于稳定点 $C'(1,1)$, 选择(投入保鲜努力, 投入保鲜努力)的概率高; 当 $S'_1 = S'_2$ 时, 双方趋向于稳定点 $O'(0,0)$ 和稳定点 $C'(1,1)$ 的概率相等, 选择(投入保鲜努力, 投入保鲜努力)和(不投入保鲜努力, 不投入保鲜努力)的概率相等。

以 S'_1 为例分析参数变化对演化结果的影响:

$$S'_1 = S_{O'AD'} + S_{OBD'} = \frac{1}{2} \left[\frac{f + r_2 - \frac{(1-b)nm^2}{2}}{e_2 + r_2 - (1-a)q(u_0 + km)} + \frac{f + r_1 - \frac{bnm^2}{2}}{e_1 + r_1 - aq(u_0 + km)} \right] \quad (18)$$

由 $\frac{\partial S'_1}{\partial f} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{e_2 + r_2 - (1-a)q(u_0 + km)} + \frac{1}{e_1 + r_1 - aq(u_0 + km)} \right] < 0$ 可知, S'_1 是关于罚金 f 的减函数, 随

着罚金 f 的增加, 供应链参与主体更倾向于向(投入保鲜努力, 投入保鲜努力)方向演化。通过对比分析图 1 和图 2 可知, 引入罚金后整体演化博弈趋向于向(投入保鲜努力, 投入保鲜努力)方向演化, 因此, 罚金的引入能够提高供应链主体投入保鲜努力的意愿, 可以以此来规范供应链成员的行为, 促进价值共创的实现。

5. 结论与展望

本研究基于价值共创视角, 构建生鲜农产品供应链演化博弈模型, 分析生产商和零售商在不同情境下投入保鲜努力决策的动态演化博弈过程。研究表明, 生鲜供应链应建立合理的收益分配和成本分担机制来激励成员投入保鲜努力, 促进合作共赢, 实现价值共创。同时, 为防止机会主义行为应引入奖惩机制, 以促进供应链成员向“投入保鲜努力”决策方向演化, 并通过制定行业规则、签订明确契约、设立失信成员榜单等措施来减少搭便车行为, 以实现供应链整体利益并长期合作共赢。本文结合生鲜农产品特点, 引入新鲜度函数及考虑农产品新鲜度的成本、收益函数来构建演化博弈模型, 并进一步分析相关参数对演化路径的影响, 体现出一定的创新性。今后, 将在此基础上, 一是考虑生产商、批发商、零售商三方及多方主体参与, 二是考虑选择自建还是采用第三方冷链保鲜系统, 这两种情形下的供应链投入保鲜努力决策博弈与演化机制, 以进一步深化研究。

基金项目

天津市教委社会科学重大项目(2021JWZD34), 天津农学院研究生教育教学研究与改革项目(2021-YA-004)。

参考文献

- [1] Jing, Q.W.C.L. (2020) Modelling Dynamic Freshness-Keeping Effort over a Finite Time Horizon in a Two-Echelon Online Fresh Product Supply Chain. *European Journal of Operational Research*, **293**, 511-528. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.12.035>
- [2] 王苗苗, 江雯雯, 朱晓曦. 成本共担契约下生鲜农产品供应链融资策略优化研究[J]. 云南农业大学学报(社会科学)

- 学), 2023, 17(2): 116-126.
- [3] 曹晓宁, 王永明, 薛方红, 刘晓冰. 供应商保鲜努力的生鲜农产品双渠道供应链协调决策研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(3): 109-118.
- [4] 周涛, 吕圆圆, 周亚萍. “农超对接”双渠道生鲜农产品供应链协调研究——基于不同主体保鲜努力视角[J]. 管理现代化, 2022, 42(1): 8-16.
- [5] 史保阳, 史保莉. 考虑努力水平与损耗的农超对接生鲜产品供应链协调[J]. 工业工程与管理, 2019, 24(5): 43-48+55.
- [6] 魏杰, 姜云超. 考虑供应商保鲜努力的生鲜电商销售模式选择[J]. 控制与决策, 2024, 39(3): 1030-1038.
- [7] 李昌兵, 汪尔晶, 杨宇. 政府监管下冷链物流资源投入的演化博弈研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2017, 16(3): 108-118.
- [8] 杨松, 庄晋财, 王爱峰. 惩罚机制下农产品质量安全投入演化博弈分析[J]. 中国管理科学, 2019, 27(8): 181-190.
- [9] 戢守峰, 刘红玉, 王丽洁, 等. PI环境下考虑保鲜努力的冷链产品生产-库存-运输联合优化模型与求解[J/OL]. 中国管理科学: 1-13. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.1949>, 2024-03-21.
- [10] Friedman, D. (1991) Evolutionary Games in Economics. *Econometrica*, **59**, 637-666. <https://doi.org/10.2307/2938222>