

企业绿色创新的演化博弈分析及系统动力学仿真

马艳华, 刘生敏*, 陶果香

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2023年5月29日; 录用日期: 2023年7月19日; 发布日期: 2023年7月26日

摘要

为促进企业进行绿色创新, 减少环境污染, 在有限理性条件下创建了政府、企业和消费者三个利益关系主体的演化博弈模型, 并运用Vensim PLE进行系统动力学仿真。研究表明, 政府和消费者的决策会影响企业选择绿色创新的策略, 二者相辅相成; 企业绿色创新会因过高的绿色创新成本受到抑制, 而政府对其进行补贴或惩罚会促进绿色创新。最后, 提出了促进企业采取绿色创新的政策建议。

关键词

绿色创新, 演化博弈, 三方博弈, 系统动力学

Evolutionary Game Analysis and System Dynamics Simulation of Enterprise Green Innovation

Yanhua Ma, Shengmin Liu*, Guoxiang Tao

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: May 29th, 2023; accepted: Jul. 19th, 2023; published: Jul. 26th, 2023

Abstract

In order to promote enterprises to implement green innovation to reduce environmental pollution, an evolutionary game model among government, enterprises and consumers is developed under the condition of restricted rationality, and the system dynamics simulation is performed by

*通讯作者。

applying Vensim PLE. The outcome indicates that the decision of the government and consumers will influence the enterprises' choice of green innovation strategy, the two complement each other. Enterprise green innovation is restrained by the high cost of green innovation, and the government's subsidy or punishment will promote green innovation. Finally, some policy suggestions promote enterprises to adopt green innovation.

Keywords

Green Innovation, Evolutionary Game, Tripartite Game, System Dynamics

Copyright © 2023 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

随着社会生产力的迅速发展和经济的快速提高,我国的环境问题日益突出,如何平衡经济发展与生态环境已成为当前急需解决的问题[1]。为了促进我国生态环境的基本改善以建设美丽中国,必须坚持以政府为主导、企业为主体、社会组织和大众参与为重要支撑的制度机制,构建一个有利于全社会参与的环境治理新格局[2]。创新是可持续发展的重要驱动力,绿色化是推动经济高质量发展和创新驱动发展的重要依据[3]。绿色创新是对创新的一种拓展,是生态文明视域下创新的崭新形态,能够带来较好的经济效益和环境效益的创新[4]。

绿色创新不仅涉及绿色技术和绿色产品的创新,还包括企业在生产经营中在绿色组织、制度和管理上的创新。运用绿色创新可以提高环境管理绩效,以满足环境保护的要求[5]。和一般的创新相比,绿色创新具有“双重外部性”这一特殊属性。Rennings [6]等的研究显示,绿色创新不但可以产生其他创新所具有的共同溢出效应,同时也会带来外部环境成本的问题。虽然整个社会从绿色创新中受益,但是,创新产生的成本却要由一个公司来支付,而且绿色创新者无法从绿色创新中获取全部乃至大多数利益,这种特性导致企业进行绿色创新的积极性不高。因此,相比于过去相对独立的内部创新,绿色创新活动涉及的主体更具异质性和多元化,企业若想实现绿色发展离不开利益相关者的推动和支持。

大多研究表明,企业采取绿色创新、实现经济可协调发展的重要手段之一是政府的环境规制[7]。环境规制是指国家通过制定出台相应的法律法规、环境标准或措施对企业经济活动进行直接或间接的调节,如碳排放交易试点政策、废气废水的排放标准制定、生产技术标准、污染税的征收等等,以实现保护生态环境的目的。“波特假说”认为,在一定的环境规制政策下,可以增强企业的环保意识,促进其开展绿色创新行为,而由此产生的创新收益能够抵消用于实施环境规制而产生的成本[8]。曹霞通过建立政府、企业与消费者的“利益-权力”矩阵,认为政府通过对企业征收污染税能够推动绿色技术创新的实施[9]。余东华利用面板数据发现,环境规制对企业技术创新的影响具有明显的门槛效应,既存在“创新补偿效应”,又具有“遵循成本效应”。因此,只有在适宜的环境规制强度下所得的创新收益才能弥补规制成本[10]。Chakraborty 发现适度的环境规制能够倒逼企业进行绿色生产,使企业的创新支出尤其是研发投入显著增加[11]。

除政府实施的环境规制之外,作为“软手段”的公众参与在补偿政府与市场失灵方面有其独特的优越性[12]。在当前的可持续背景下,公众作为环境污染的切身感受者,会对企业的破坏环境行为更为关注。而且,随着公众的环保意识逐渐增强,其对于绿色产品的需求也逐步被激发出来,而这种需求的变化最

终反映到市场需求的更新。企业若想抢占市场,就必须快速适应消费者需求的变化,通过技术创新迅速研发出适应消费者需求的绿色产品才能赢得市场份额[13]。Cleff 和 Rennings 发现顾客需求、战略市场目标对企业采取绿色创新能产生重大影响[14]。秦炳涛等人认为,尤其是在经济比较发达的区域,公众参与对企业的绿色技术创新有着更为显著的激励作用。同时,本地的公众参与还会对周边一些经济差距较小的区域产生显著的空间溢出效应[15]。孙迪在研究发现,消费者绿色偏好的提高能够有效扩大对于绿色产品的需求,且在政府补贴消费者的情况下可以更大程度上增加需求,提升绿色生产者的效益,进而促进绿色产品的发展[16]。马光红指出,消费者对环保产品的认同程度越高,其心理效用也就越大,由此提升的绿色产品需求使企业有了绿色技术创新的动力[17]。

综合现有文献,大部分学者在探讨企业绿色创新的相关影响因素时,大多关注于政府环境规制对其决策的影响,而针对公众参与特别是消费者绿色偏好这一非正式的环境规制对企业实施绿色创新策略的影响研究不多。此外,在基于博弈的视角来探讨绿色技术创新的外部性激励因素中,也很少有文献从政府和公众两个主体的政策合力出发来探讨企业开展绿色创新的策略。因此,本文建立了一个政府、企业和消费者这三个相互影响主体的绿色创新系统演化博弈模型,并对其均衡的条件与均衡点的稳定性进行了研究,并进一步借助系统动力学仿真来分析政府环境规制、消费者绿色偏好和企业绿色创新成本等对企业采取绿色创新策略的影响,以期能够为更好地实现经济与生态环境协调发展提供借鉴。

2. 模型构建与演化博弈收益分析

2.1. 模型构建

假设 1: 三方博弈的参与者,即政府、企业和消费者都是有限理性的,且都寻求能够使自身利益最大化的策略选择。

假设 2: 政府环境规制的概率为 x , 不进行环境规制的概率为 $1-x$; 企业绿色创新的概率为 y , 不绿色创新的概率为 $1-y$; 消费者绿色消费的概率为 z , 传统消费的概率为 $1-z$ 。其中, $x, y, z \in [0, 1]$, 且均为时间 t 的函数。

假设 3: 政府选择环境规制所付出的规制成本为 G , 规制时获得的政绩收益为 R , 政府不进行环境规制时既不花费成本也不获得收益。

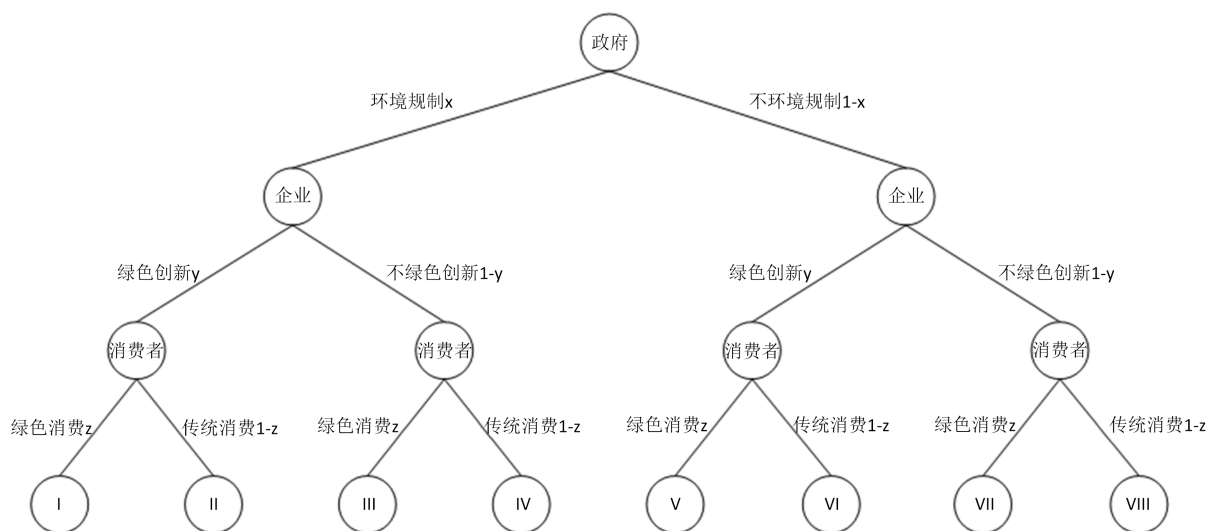


Figure 1. Strategy game tree
图 1. 策略博弈树

假设 4: 企业不绿色创新时的成本为 C , 所获得的收益为 P_1 , 在政府进行环境规制时会受到惩罚 K ; 企业选择绿色创新时需要付出额外成本, 即创新投入 I , 此时的收益为 P_2 , 具有绿色消费偏好的消费者会为绿色创新企业带来额外收益 Q , 在政府进行环境规制时企业会获得政府补贴 L 。

假设 5: 消费者选择传统消费时付出的成本为 H_1 , 获得的心理效用为 S_1 ; 消费者选择绿色消费且企业选择绿色创新时, 消费者付出的成本为 H_2 , 获得的心理效用为 S_2 , 在政府进行环境规制时消费者会获得消费补贴 T , 而消费者选择绿色消费时企业若仍进行传统生产, 则消费成本为 $H_3 (H_3 > H_2)$ 。

基于以上假设, 政府、企业和消费者三个博弈主体共存在 8 种策略组合, 得到的博弈树如图 1, 收益矩阵如表 1 所示。

Table 1. Revenue matrix of tripartite game model

表 1. 三方博弈模型收益矩阵

| 政府 | 企业 | 消费者 | |
|-------|-------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | | 绿色消费 | 传统消费 |
| 环境规制 | 绿色创新 | $(R-L-T-G, P_2+L+Q-I-C, T+S_2-H_2)$ | $(R-L-G, P_2+L-I-C, S_1-H_1)$ |
| | 不绿色创新 | $(R+K-T-G, P_1-C-K, T+S_2-H_3)$ | $(R+K-G, P_1-C-K, S_1-H_1)$ |
| 不环境规制 | 绿色创新 | $(0, P_2+Q-I-C, S_2-H_2)$ | $(0, P_2-I-C, S_1-H_1)$ |
| | 不绿色创新 | $(0, P_1-C, S_2-H_3)$ | $(0, P_1-C, S_1-H_1)$ |

2.2. 演化博弈收益分析

根据以上模型假设和收益矩阵, 可以分别求出政府、企业、消费者的复制动态方程。

设 U_{11} 、 U_{12} 分别代表政府选择环境规制与不环境规制的收益, 平均收益为 U_1 , 则有:

$$\begin{aligned}
 U_{11} &= (R-L-T-G)yz + (R-L-G)y(1-z) \\
 &\quad + (R+K-T-G)(1-y)z + (R+K-G)(1-y)(1-z) \\
 &= (R+K-G) - Tz - (K+L)y
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$U_{12} = 0 \tag{2}$$

$$U_1 = xU_{11} + (1-x)U_{12} \tag{3}$$

政府的复制动态方程为:

$$\begin{aligned}
 F(x) &= dx/dt = x(U_{11} - U_1) = x(1-x)(U_{11} - U_{12}) \\
 &= x(1-x)[(R+K-G) - Tz - (K+L)y]
 \end{aligned} \tag{4}$$

x 的一阶导数和设定的 $G(y)$ 分别为:

$$\frac{\partial F(x)}{\partial x} = (1-2x)[(R+K-G) - Tz - (K+L)y] \tag{5}$$

$$G(y) = (R+K-G) - Tz - (K+L)y \tag{6}$$

根据微分方程稳定性定理可知, 政府选择规制时的稳定性状态需要满足: $F(x)=0$ $1-x$ 且 $\partial F(x)/\partial x < 0$ 。由于 $\partial G(y)/\partial y < 0$, 故 $G(y)$ 为减函数。故当 $y = y^* = \frac{R+K-G-Tz}{K+L}$ 时, $G(y)=0$, 此时 $\partial F(x)/\partial x \equiv 0$ 。当 $0 < y < y^*$ 时, $G(y) > 0$, 此时 $\partial F(x)/\partial x|_{x=1} < 0$, 则 $x=1$ 为政府的演化稳定策略; 当 $y^* < y < 1$ 时, $G(y) < 0$, 此时 $\partial F(x)/\partial x|_{x=0} < 0$, 则 $x=0$ 为政府的演化稳定策略。因此, 政府策略选择

的演化过程如图 2 所示。

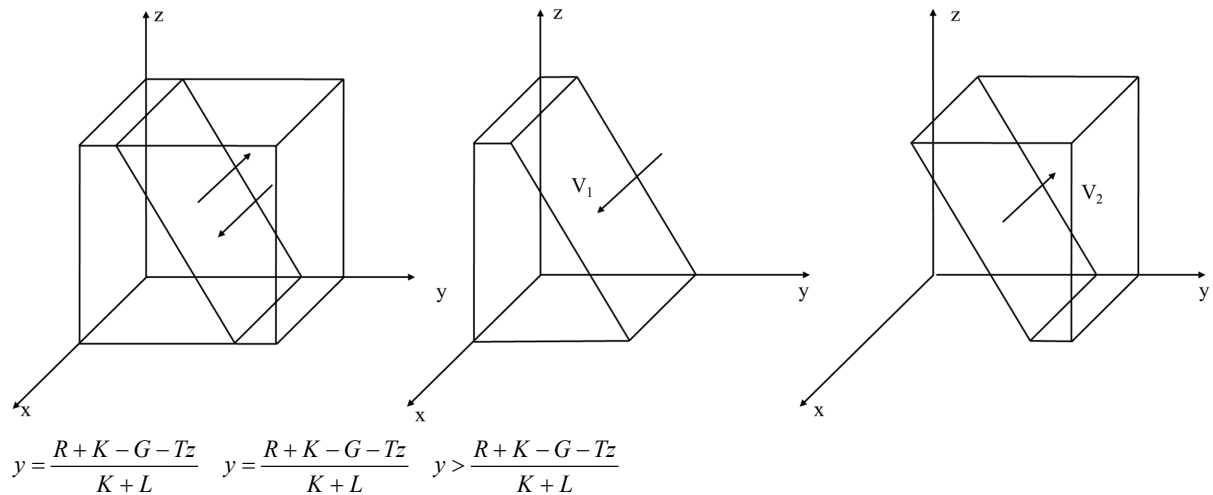


Figure 2. The government replicates the dynamic phase diagram

图 2. 政府复制动态相位图

由图 2 可以得出以下两个结论:

1) 当企业选择“绿色创新”策略的概率 $y < \frac{R+K-G-Tz}{K+L}$ 时, 政府倾向于选择“环境规制”策略 ($x \rightarrow 1$); 相反, 当企业选择“绿色创新”策略的概率 $y > \frac{R+K-G-Tz}{K+L}$ 时, 政府倾向于选择“不环境规制”策略 ($x \rightarrow 0$)。这是由于, 当市场中只有较少的企业选择绿色创新进行绿色生产时, 政府会对企业实施一定的补贴和惩罚等环境规制措施来鼓励企业进行绿色创新; 而当市场中绿色创新的企业达到一定的比例, 形成了良好的绿色创新环境甚至行业标准后, 政府实施环境规制的动机便开始减弱。

2) 政府的环境规制率关于政绩收益正相关, 关于规制成本、对企业的惩罚与补贴和对消费者的补贴负相关。当其他参数不变时, 由于 $y^* = \frac{R+K-G-Tz}{K+L} = \frac{R-G-L-Tz}{K+L} + 1$, 当 R 变大时, y^* 变大, 截面会右移, 则 V_1 的体积会变大, 即政府趋于“环境规制”策略。当 K, L 和 G 变大时, y^* 变小, 截面会左移, 则 V_2 的体积会变大, 即政府趋于“不环境规制”策略。

同理, 设企业选择绿色创新与不创新的收益分别为 U_{21} 、 U_{22} , 平均收益为 U_2 , 则有:

$$\begin{aligned}
 U_{21} &= (P_2 + L + Q - I - C)xz + (P_2 + L - I - C)x(1-z) \\
 &\quad + (P_2 + Q - I - C)(1-x)z + (P_2 - I - C)(1-x)(1-z) \\
 &= Lx + Qz + (P_2 - I - C)
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 U_{22} &= (P_1 - C - K)xz + (P_1 - C - K)x(1-z) \\
 &\quad + (P_1 - C)(1-x)z + (P_1 - C)(1-x)(1-z) \\
 &= P_1 - C - Kx
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$U_2 = yU_{21} + (1-y)U_{22} \tag{9}$$

企业的复制动态方程为:

$$F(y) = dy/dt = y(U_{21} - U_2) = y(1-y)(U_{21} - U_{22}) = y(1-y)[(L+K)x + Qz + P_2 - P_1 - I] \tag{10}$$

y 的一阶导数和设定的 $G(z)$ 分别为:

$$\frac{\partial F(y)}{\partial y} = (1-2y)[(L+K)x + Qz + P_2 - P_1 - I] \tag{11}$$

$$G(z) = (L+K)x + Qz + P_2 - P_1 - I \tag{12}$$

同理，企业采取绿色创新时的稳定性状态需要满足： $F(y)=0$ 且 $\partial F(y)/\partial y < 0$ 。由于 $\partial G(z)/\partial z > 0$ ，故 $G(z)$ 为增函数。故当 $z = z^* = -\frac{(L+K)x + P_2 - P_1 - I}{Q}$ 时， $G(z) = 0$ ， $\partial F(y)/\partial y = 0$ 。当 $0 < z < z^*$ 时， $G(z) < 0$ ，此时 $\partial F(y)/\partial y|_{y=0} < 0$ ，则 $y=0$ 为企业的演化稳定策略；当 $z^* < z < 1$ 时， $G(z) > 0$ ，此时 $\partial F(y)/\partial y|_{y=1} < 0$ ，则 $y=1$ 为企业的演化稳定策略。因此，企业策略选择的演化过程如图 3 所示。

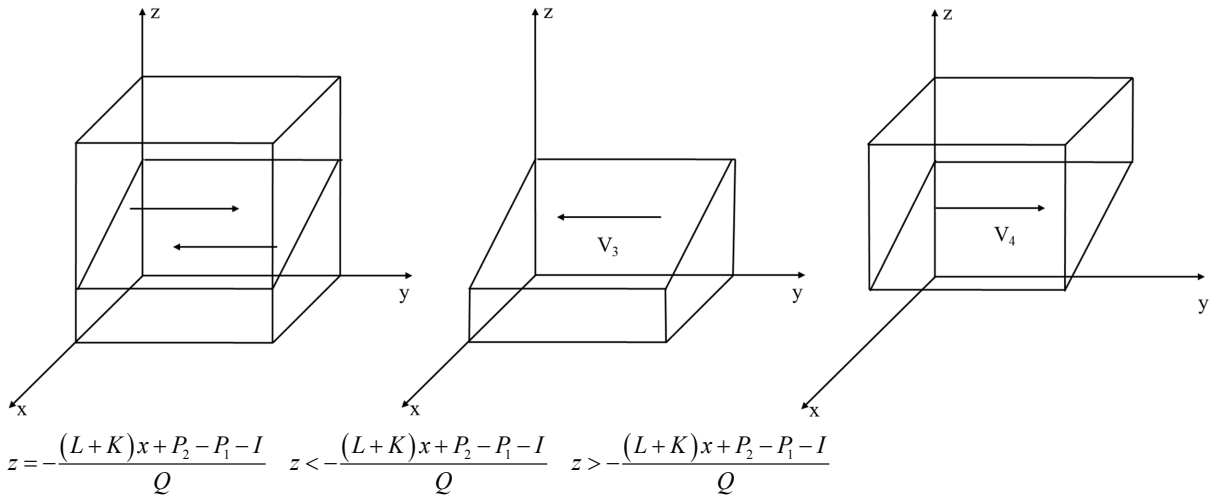


Figure 3. Enterprise copy dynamic phase diagram
图 3. 企业复制动态相位图

由图 3 可以得出以下两个结论：

1) 当消费者选择“绿色消费”策略的概率 $z < -\frac{(L+K)x + P_2 - P_1 - I}{Q}$ 时，企业倾向于选择“不绿色创新”策略 ($y \rightarrow 0$)；相反，当消费者选择“绿色消费”策略的概率 $z > -\frac{(L+K)x + P_2 - P_1 - I}{Q}$ 时，企业倾向于选择“绿色创新”策略 ($y \rightarrow 1$)。这是因为消费者对绿色消费的认识还很薄弱，没有建立起一个绿色消费市场，因此，企业就不会进行绿色创新；而随着消费者对环境保护意识的增强，绿色产品的市场也在不断地扩展，企业为了迎合消费者的需求而调整自身的生产策略以获得更多的利润。

2) 企业的绿色创新率关于政府对企业的奖惩正相关，而与创新投入负相关。其他参数不变时，由于 $z^* = -\frac{(L+K)x + P_2 - P_1 - I}{Q}$ ，当 K, L 变大时， z^* 变小，截面会下移，则 V_4 的体积会变大，即企业趋于“绿色创新”策略。当 I 变大时，绿色创新与不创新的收益差变小， z^* 变大，截面上移，则 V_3 的体积会变大，即企业趋于“不绿色创新”策略。

同理，设消费者选择绿色消费与传统消费的收益分别为 U_{31} 、 U_{32} ，平均收益为 U_3 ，则有：

$$\begin{aligned} U_{31} &= (T + S_2 - H_2)xy + (T + S_2 - H_3)x(1-y) \\ &\quad + (S_2 - H_2)(1-x)y + (S_2 - H_3)(1-x)(1-y) \\ &= Tx - (H_2 - H_3)y + S_2 - H_3 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 U_{32} &= (S_1 - H_1)xy + (S_1 - H_1)x(1 - y) \\
 &\quad + (S_1 - H_1)(1 - x)y + (S_1 - H_1)(1 - x)(1 - y) \\
 &= S_1 - H_1
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

$$G(x) = Tx - (H_2 - H_3)y + S_2 - H_3 - (S_1 - H_1)
 \tag{15}$$

消费者的复制动态方程为:

$$\begin{aligned}
 F(z) &= dz/dt = z(U_{31} - U_3) = z(1 - z)(U_{31} - U_{32}) \\
 &= z(1 - z)[Tx - (H_2 - H_3)y + S_2 - H_3 - (S_1 - H_1)]
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

z 的一阶导数和设定的 $G(x)$ 分别为:

$$\frac{\partial F(z)}{\partial z} = (1 - 2z)[Tx - (H_2 - H_3)y + S_2 - H_3 - (S_1 - H_1)]
 \tag{17}$$

$$G(x) = Tx - (H_2 - H_3)y + S_2 - H_3 - (S_1 - H_1)
 \tag{18}$$

同理, 消费者选择绿色消费时的稳定性状态需要满足 $G(x)$: $F(z) = 0$ 且 $\partial F(z)/\partial z < 0$ 。由于 $\partial G(x)/\partial x > 0$, 故 $G(x)$ 为增函数。故当 $x = x^* = \frac{(H_2 - H_3)y + (S_1 - H_1) - (S_2 - H_3)}{T}$ 时, $G(x) = 0$, 此时 $\partial F(z)/\partial z \equiv 0$ 。当 $0 < x < x^*$ 时, $G(x) < 0$, 此时 $\partial F(z)/\partial z|_{z=0} < 0$, 则 $z = 0$ 为消费者的演化稳定策略; 当 $x^* < x < 1$ 时, 此时 $\partial F(z)/\partial z|_{z=1} < 0$, 则 $z = 1$ 为消费者的演化稳定策略。因此, 消费者策略选择的演化过程如图 4 所示。

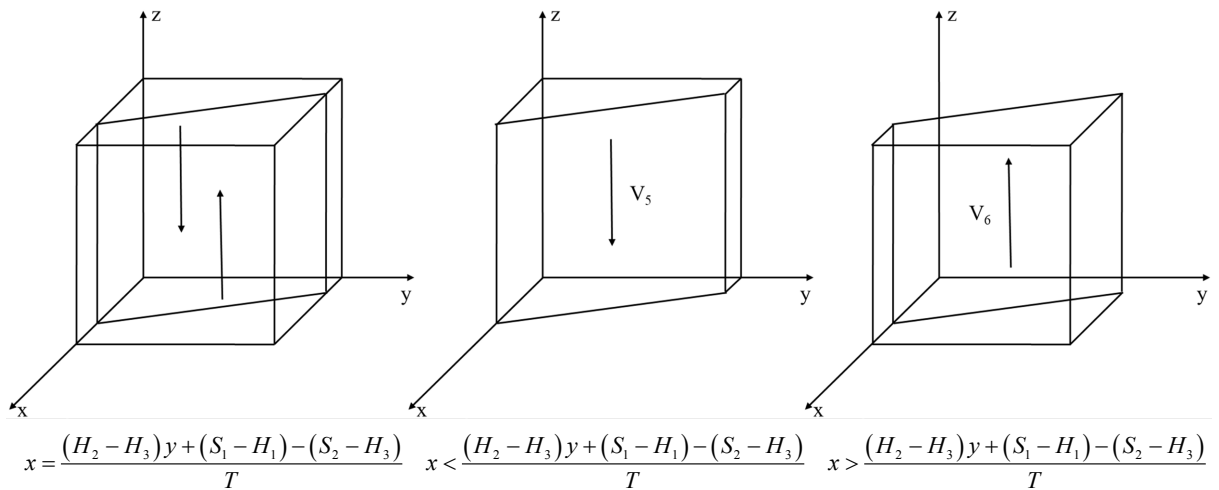


Figure 4. Consumer copies dynamic phase diagram
图 4. 消费者复制动态相位图

由图 4 可以得出以下两个结论:

- 1) 当政府选择“环境规制”策略的概率 $x < \frac{(H_2 - H_3)y + (S_1 - H_1) - (S_2 - H_3)}{T}$ 时, 消费者倾向于选择“不绿色消费”策略 ($z \rightarrow 0$); 相反, 当政府选择“环境规制”策略的概率 $x > \frac{(H_2 - H_3)y + (S_1 - H_1) - (S_2 - H_3)}{T}$ 时, 消费者倾向于选择“绿色消费”策略 ($z \rightarrow 1$)。政府在进行加大环境规制力度时不仅鼓励企业进行绿色创新, 而且引导消费者进行绿色消费, 对消费者发放一定的补贴

和优惠政策，能够促进消费绿色转型。

2) 消费者的绿色消费率关于消费补贴正相关。其他参数不变时，由于

$x = \frac{(H_2 - H_3)y + (S_1 - H_1) - (S_2 - H_3)}{T}$ ，当变大时， x^* 变小，截面会后移，则 V_6 的体积会变大，即消费者趋于“绿色消费”策略。

2.3. 演化稳定性分析

同时令 $F(x) = 0, F(y) = 0, F(z) = 0$ ，求解可得 15 个均衡点，分别为： $E_1(0,0,0)$ 、 $E_2(0,1,0)$ 、 $E_3(0,0,1)$ 、 $E_4(0,1,1)$ 、 $E_5(1,0,0)$ 、 $E_6(1,0,1)$ 、 $E_7(1,1,0)$ 、 $E_8(1,1,1)$ 、 $E_9\left(\frac{P_1+I-Q-P_2}{K+L}, \frac{R+K-G-T}{K+L}, 1\right)$ 、 $E_{10}\left(0, \frac{S_2-H_3-(S_1-H_1)}{H_2-H_3}, \frac{P_1+I-P_2}{Q}\right)$ 、 $E_{11}\left(1, \frac{T+S_2-H_3-(S_1-H_1)}{H_2-H_3}, \frac{P_1+I-P_2-K-L}{Q}\right)$ 、 $E_{12}\left(\frac{S_1-H_1-(S_2-H_3)}{T}, 0, \frac{R+K-G}{T}\right)$ 、 $E_{13}\left(\frac{S_1-H_1-(S_2-H_2)}{T}, 1, \frac{R-G-L}{T}\right)$ 、 $E_{14}\left(\frac{P_1+I-P_2}{K+L}, \frac{R+K-G}{K+L}, 0\right)$ 、 $E_{15}(x^*, y^*, z^*)$ 。

$$\begin{aligned} \text{其中 } x^* &= \frac{[Q(R+K-G)-T(P_1+I-P_2)](H_2-H_3)-Q(K+L)(S_2-H_3-S_1+H_1)}{(Q-H_2+H_3)(K+L)T}, \\ y^* &= \frac{Q(R+K-G)-T(P_1+I-P_2)-(K+L)(S_2-H_3-S_1+H_1)}{(Q-H_2+H_3)(K+L)}, \\ z^* &= \frac{(R+K-G)(H_2-H_3)-T(P_1+I-P_2)-(K+L)(S_2-H_3-S_1+H_1)}{(H_2-H_3-Q)T}. \end{aligned}$$

根据 Friedman (1991) [18]提出的分析方法，当矩阵中的所有特征值都不是正数时，此时的系统处于稳定状态，并且存在唯一的均衡点，即渐进稳定点。由式(4)、(10)、(16)可得绿色创新复制动力系统的雅可比矩阵 J ，将以上求得的均衡点分别带入雅可比矩阵，得出绿色创新演化稳定策略的条件如表 2。

$$J = \begin{pmatrix} (1-2x)[(R+K-G)-Tz-(K+L)y] & -x(1-x)(K+L) & -x(1-x)T \\ y(1-y)(L+K) & (1-2y)[(L+K)x+Qz+P_2-P_1-I] & y(1-y)Q \\ z(1-z)T & -z(1-z)(H_2-H_3) & (1-2z)[Tx-(H_2-H_3)y+S_2-H_3-(S_1-H_1)] \end{pmatrix}$$

Table 2. Stability conditions of each equilibrium point
表 2. 各均衡点的稳定性条件

| 均衡点 | 稳定性条件 |
|-------------------|---|
| $E_1(0,0,0)$ | $G > R + K; P_1 > P_2 - I; S_1 - H_1 > S_2 - H_3$ |
| $E_2(0,1,0)$ | $G + L > R; P_2 - I > P_1; S_1 - H_1 > S_2 - H_2$ |
| $E_3(0,0,1)$ | $G > R + K - T; P_1 > P_2 + Q - I; S_2 - H_3 > S_1 - H_1$ |
| $E_4(0,1,1)$ | $G + T + L > R; P_2 + Q - I > P_1; S_2 - H_2 > S_1 - H_1$ |
| $E_5(1,0,0)$ | $R + K > G; P_1 - K > L + P_2 - I; (S_1 - H_1) > (S_2 - H_3) + T$ |
| $E_6(1,0,1)$ | $R + K - T > G; P_1 - K > P_2 + L + Q - I; (S_2 - H_3) + T > S_1 - H_1$ |
| $E_7(1,1,0)$ | $R > G + L; P_2 + L + K - I > P_1; S_1 - H_1 > T + (S_2 - H_2)$ |
| $E_8(1,1,1)$ | $R > G + T + L; P_2 + L + Q - I > P_1 - K; (S_2 - H_2) + T > S_1 - H_1$ |
| $E_9 \sim E_{15}$ | 存在互为相反数的特征值，鞍点 |

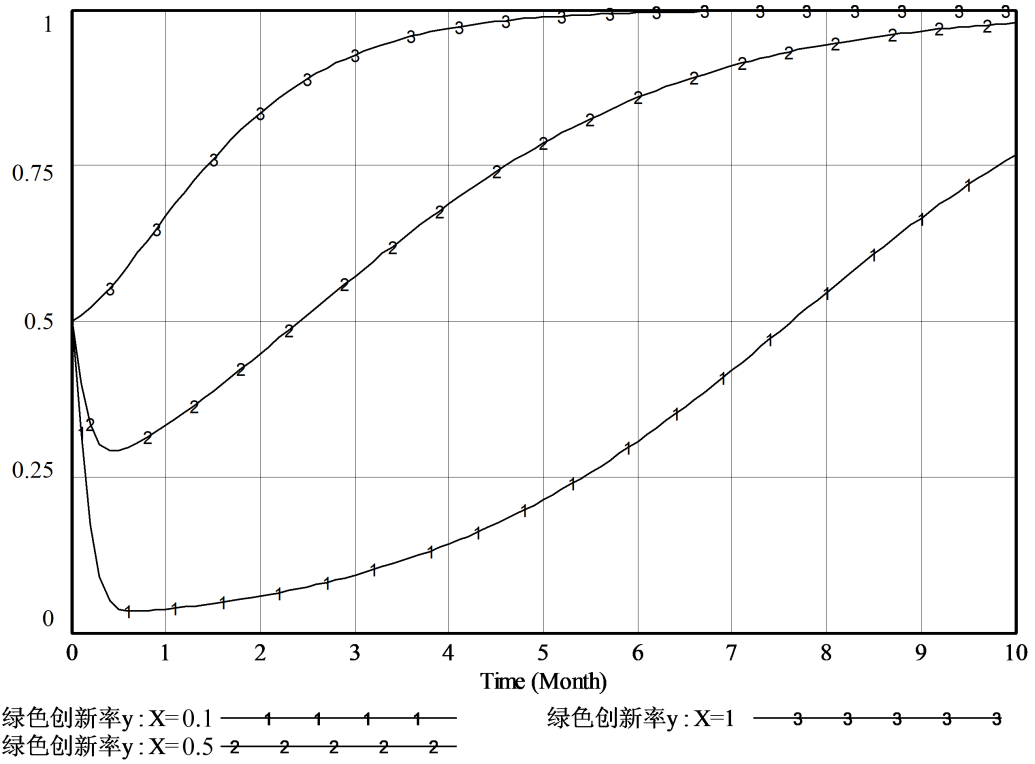


Figure 6. Evolution curve under the change of government environmental regulation rate
图 6. 政府环境规制率变化下的演化曲线

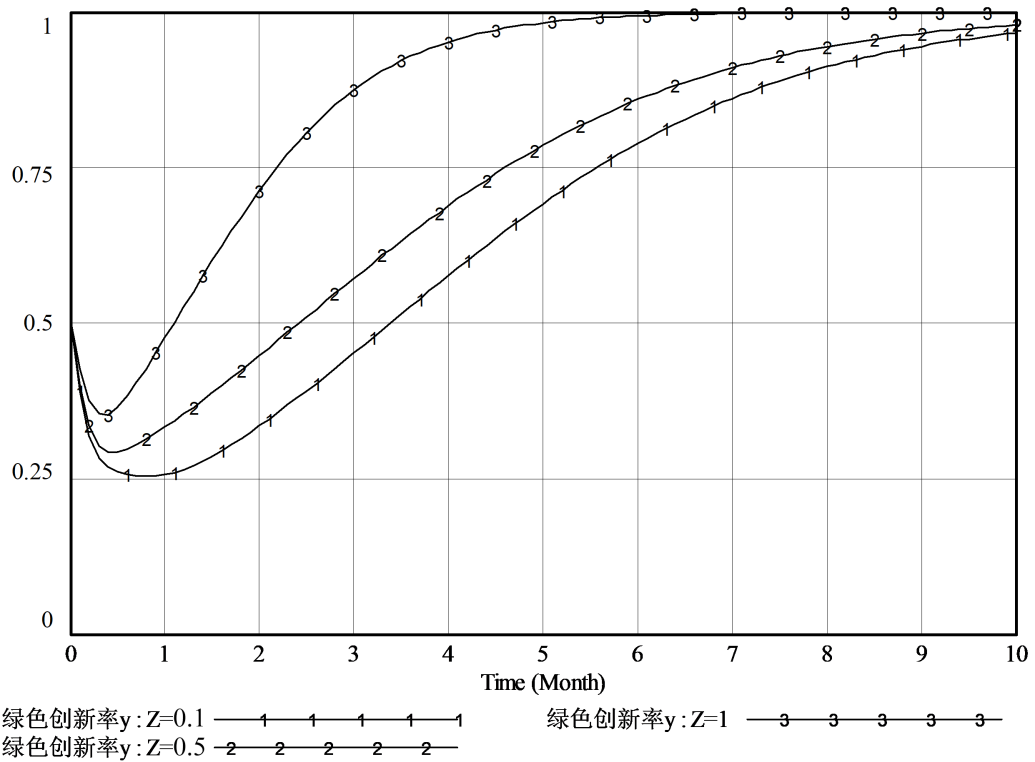


Figure 7. Evolution curve under the change of green consumption rate
图 7. 绿色消费率变化下的演化曲线

2) 绿色消费率对企业绿色创新的影响。假设企业绿色创新率的初始值 y 为 0.5, 改变绿色消费的概率 z , 分别为 0.1、0.5、1, 表示高中低强度的绿色消费率, 如图 7 所示。在政府环境规制率不变的情况下, 当 z 较高时, 企业绿色创新率随着 z 的上升而上升, 这时因为随着消费者的绿色消费和低碳意识的增强, 绿色、低碳的消费成为了市场的主流, 企业必然要提升绿色创新水平, 扩大绿色低碳产品供给。当 z 为 0.1 时, 政府的环境规制使企业在绿色创新时有利可图, 所以此时的企业绿色创新率与 z 较高时相比, 差别不大。但 z 较低时无法使企业快速达到绿色创新的稳定状态, 所以除了消费者态度的转变, 还可结合政府措施。

3) 环境规制率与绿色消费率对企业绿色创新率的共同影响。假设企业绿色创新率的初始值 y 为 0.5, 同时改变政府环境规制及绿色消费的概率 x 、 z , 验证两者对企业绿色创新率的影响效果, 如图 8 所示。当消费者绿色消费率为 0.1 时, 无论政府如何进行规制, 企业始终无法稳定的选择绿色创新策略, 说明虽然政府实施环境规制给予企业一定的压力或补贴, 但是如果消费者绿色消费率不高, 企业同样不能获得稳定的利益, 此时一旦政府策略稍有变动, 企业便会闻风而动。而当消费者绿色消费率较高为 0.5 时, 政府只要稍微提高环境规制率便可以轻易的使企业做出绿色创新。当环境规制率为 0.1 时, 消费者的绿色消费率变动同样不能使企业稳定的做出绿色创新的选择, 因为在政府不环境规制时, 企业传统生产能获得更高的收益, 企业更愿意选择不进行绿色创新。而当环境规制率较高为 0.5 时, 政府的规制措施使企业在察觉到消费者绿色消费意愿时愿意做出绿色创新。所以要想使企业快速选择绿色创新, 政府和消费者的作用缺一不可。

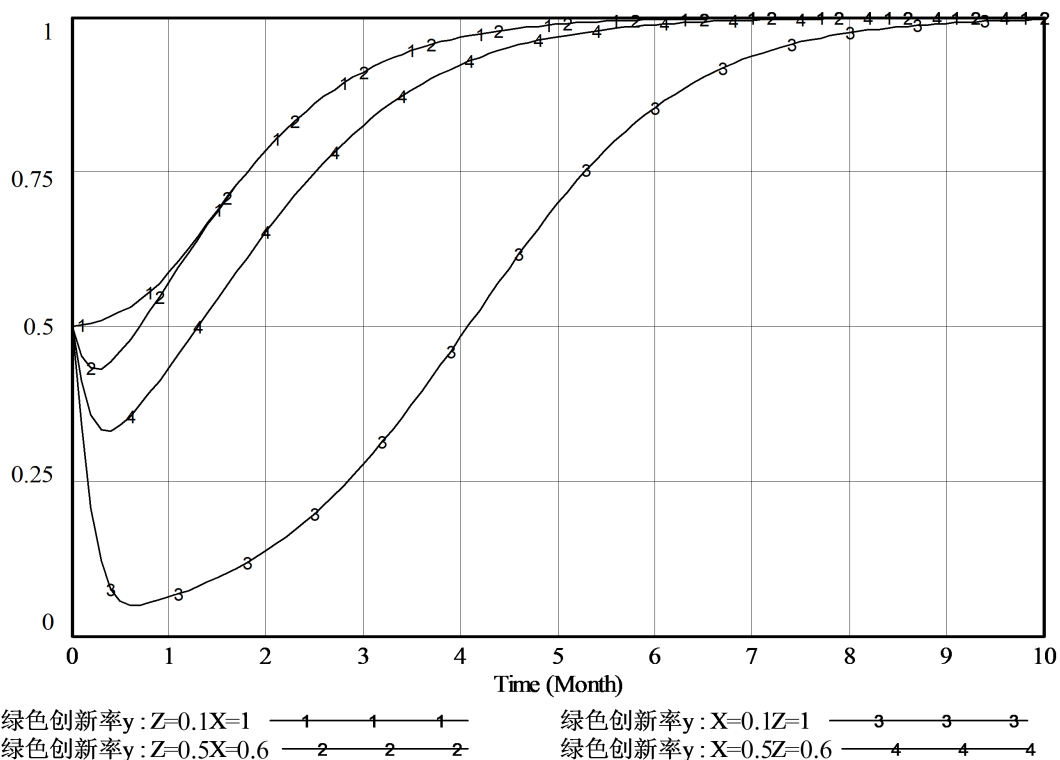


Figure 8. Evolution curve under the joint influence of environmental regulation rate and green consumption rate

图 8. 环境规制率、绿色消费率共同影响下的演化曲线

4) 创新成本对企业绿色创新的影响。企业在实施绿色创新时需要付出一定的技术和工艺等方面的投入, 当创新投入达到一定的额度, 企业会衡量预期的投入以及收益, 在对收益产生较大的压力时, 减少

略，二者缺一不可。第三，企业过高的创新成本会抑制其绿色创新，政府可通过补贴或惩罚等手段对企业进行引导。

基于以上分析，为促进政府、企业和消费者的良性互动，构建绿色创新技术体系，提出以下四点建议：

第一，加强对企业绿色技术创新的引导。制定产业和环境准入规划，生态经济发展规划，发布绿色技术推广目录，引导企业绿色创新和产业的发展方向，鼓励科研人员创办绿色技术创新企业，发挥政府在生态文明建设中的主导作用。

第二，引导公众绿色消费理念。通过大力推行各种形式的环保宣传，充分发挥新闻媒体的绿色价值导向功能，树立公众消费绿色化的理念，采取措施激发全社会生产和消费绿色产品的内生动力，比如采取绿色消费补贴、积分兑换等方式促进公众绿色低碳生活。

第三，推进绿色创新成果转化。通过建设绿色技术交易中介机构、推进绿色发展领域“产学研金介”融合、组建绿色创新科研团队等加快绿色技术成果转化效率。围绕绿色创新等开展机制体制创新和综合示范，总结和模仿推广成功案例，发挥示范区的引领作用。

第四，加强企业创新成本管理。形成创新成本价值链体系，覆盖研发、生产、财务、采购、销售等多部门，深化业财的协同与融合，形成有效的数据信息传递。加强企业绿色生产的动因分析和挖掘，将资源进行更合理有效地配置，提高创新效率。

本文仍存在一些局限性。首先，除了政府和消费者外，企业还存在很多利益相关者会影响企业的经营和决策，后续的研究可以更加细致地探讨多个利益相关者对企业绿色创新的协同作用。其次，本文运用系统动力学仿真的方法，并未用实际数据进行验证，后续可搜集相关数据进行实证研究和验证。

参考文献

- [1] Ghisetti, C. and Rennings, K. (2014) Environmental Innovations and Profitability: How Does It Pay to Be Green? An Empirical Analysis on the German Innovation Survey. *Journal of Cleaner Production*, **75**, 106-117. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.097>
- [2] 国务院办公厅. 关于构建现代环境治理体系的指导意见[J]. 江西建材, 2020(2): 2-3.
- [3] Borghesi, S., Crespi, F., D'Amato, A., Mazzanti, M. and Silvestri, F. (2015) Carbon Abatement, Sector Heterogeneity and Policy Responses: Evidence on Induced Eco Innovations in the EU. *Environmental Science & Policy*, **54**, 377-388. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.05.021>
- [4] El-Kassar, A.-N. and Singh, S.K. (2019) Green Innovation and Organizational Performance: The Influence of Big Data and the Moderating Role of Management Commitment and HR Practices. *Technological Forecasting & Social Change*, **144**, 483-498. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.12.016>
- [5] Chen, Y.-S., Lai, S.-B. and Wen, C.-T. (2006) The Influence of Green Innovation Performance on Corporate Advantage in Taiwan. *Journal of Business Ethics*, **67**, 331-339. <https://doi.org/10.1007/s10551-006-9025-5>
- [6] Rennings, K., Ziegler, A., Ankele, K. and Hoffmann, E. (2006) The Influence of Different Characteristics of the EU Environmental Management and Auditing Scheme on Technical Environmental Innovations and Economic Performance. *Ecological Economics*, **57**, 45-59. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.03.013>
- [7] 陈思杭, 雷礼, 周中林. 环境规制、绿色技术进步与绿色经济发展——基于长江经济带十一省市面板数据的实证研究[J/OL]. 科技进步与对策: 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1224.G3.20220414.1534.015.html>, 2022-05-10.
- [8] Porter, M.E. (1991) America's Green Strategy. *Scientific American*, **264**, 168. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0491-168>
- [9] 曹霞, 张路蓬. 环境规制下企业绿色技术创新的演化博弈分析——基于利益相关者视角[J]. 系统工程, 2017, 35(2): 103-108.
- [10] 余东华, 崔岩. 双重环境规制、技术创新与制造业转型升级[J]. 财贸研究, 2019, 30(7): 15-24.
- [11] Chakraborty, P. and Chatterjee, C. (2017) Does Environmental Regulation Indirectly Induce Upstream Innovation? New Evidence from India. *Research Policy*, **46**, 939-955. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2017.03.004>
- [12] 郭进, 徐盈之. 公众参与环境治理的逻辑、路径与效应[J]. 资源科学, 2020, 42(7): 1372-1383.

- [13] 彭福扬, 王胜. 以绿色消费创新促进技术创新生态化转向[J]. 求索, 2005(2): 35-36.
- [14] Cleff, T. and Rennings, K. (1999) Determinants of Environmental Product and Process Innovation. *European Environment*, **9**, 191-201. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0976\(199909/10\)9:5<191::AID-EET201>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0976(199909/10)9:5<191::AID-EET201>3.0.CO;2-M)
- [15] 秦炳涛, 郭援国, 葛力铭. 公众参与如何影响企业绿色技术创新——基于中介效应和空间效应的分析[J]. 技术经济, 2022, 41(2): 50-61.
- [16] 孙迪, 余玉苗. 绿色产品市场中政府最优补贴政策的确切[J]. 管理学报, 2018, 15(1): 118-126.
- [17] 马光红, 夏加蕾. 环境规制背景下绿色产品技术创新多主体演化博弈分析[J]. 生态经济, 2020, 36(5): 50-56+79.
- [18] Friedman, D. (1991) Evolutionary Games in Economics. *Econometrical*, **59**, 637-666. <https://doi.org/10.2307/2938222>
- [19] 许杰, 陈富坚, 刘国平. 机动车碳税政策下政府、企业与出行者的三方演化博弈模型研究[J]. 运筹与管理, 2021, 30(9): 9-16.