

政府 - 企业 - 消费者绿色技术创新系统三方演化博弈研究

高天宇

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2025年1月10日; 录用日期: 2025年1月26日; 发布日期: 2025年2月28日

摘要

本文构建了三方演化博弈模型以研究绿色技术创新决策过程中政府 - 企业 - 消费者三方的相互影响作用及演化均衡条件。结果表明: 不同条件下, 政府、企业、消费者的均衡结果不同, 影响均衡的参数包括补贴、惩罚力度、成本、收益等, 且消费者多为受影响方; 政府可通过调整补贴与惩罚力度, 影响企业与消费者, 实现绿色转型均衡, 但该均衡依赖政府干预, 要达到无需干预的绿色市场, 需依各方初始意愿调整补贴与惩罚力度, 不当退出会致市场退回传统模式; 企业应借助政府补贴支持, 降本增效, 加大绿色技术研发投入, 降低边际成本, 提高整体收益, 引导消费者形成绿色偏好, 推动市场进入供需良性循环, 深化绿色转型。

关键词

绿色技术创新系统, 演化博弈, 环境规制, 政府监管, 创新补贴

Tripartite Evolutionary Game Study of the Government-Enterprises-Consumers Green Technology Innovation System

Tianyu Gao

School of Economics & Management, Tongji University, Shanghai

Received: Jan. 10th, 2025; accepted: Jan. 26th, 2025; published: Feb. 28th, 2025

Abstract

This paper constructs a tripartite evolutionary game model to study the interactive effects of the government-enterprise-consumer in the decision-making process of green technological innovation,

as well as the conditions for evolutionary equilibrium. The results show that under different conditions, the equilibrium outcomes for three parties are different. The parameters affecting the equilibrium include subsidies, punishment intensity, costs, and benefits, etc., and consumers are mostly the affected party. The government can influence enterprises and consumers by adjusting subsidies and punishment intensity to achieve a green transformation equilibrium. However, this equilibrium depends on government intervention. To reach a green market that requires no intervention, it is necessary to adjust subsidies and punishment intensity based on the initial preferences of all parties. Improper withdrawal can lead the market to revert to the traditional model. Enterprises should take advantage of government subsidies to reduce costs and increase efficiency, increase investment in green technology research and development, reduce marginal costs, and improve overall benefits. They should guide consumers to form green preferences, promote the market to enter a virtuous cycle of supply and demand, and deepen the green transformation.

Keywords

Green Technology Innovation System, Evolutionary Game, Environmental Regulation, Government Supervision, Innovation Subsidies

Copyright © 2025 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

在全球资源短缺与环境恶化的双重压力下，可持续发展已成为世界各国的共同战略选择。在新时代背景下，为实现“碳达峰”“碳中和”目标，经济结构优化和创新驱动发展成为我国实现高质量发展的必由之路[1]。

政府、企业和消费者是绿色技术创新系统中的核心主体，各自发挥着不可或缺的作用。企业作为绿色技术创新的主体，直接决定了绿色技术的研发投入与应用推广程度，并通过产业集聚、数字化转型等路径提高碳生产率[2][3]。绿色技术创新不仅有助于降低自然资源消耗、减少污染物排放，还能为企业带来长期的经济效益。企业通过创新提高资源利用效率、减少生产成本，从而提升市场竞争力[4]。此外，主动进行绿色技术创新的企业还能通过提高竞争力和市场反应力，促进就业增长[5]。在全球向低碳经济转型的过程中，绿色技术创新已经成为企业实现可持续发展的重要手段。

尽管绿色技术创新的重要性广为认可，但由于其较高的初期投入成本和技术不确定性，企业在选择创新路径时往往面临较大风险。因此，实现“碳达峰”“碳中和”目标离不开科学的政策设计和有效实施[6]。政府通过政策激励和规制措施，可有效降低企业技术创新的成本和风险，推动绿色技术的研发与应用[7]。在技术经济领域，政策被分为“需求推动型”和“技术拉动型”，Costantini 等研究发现，当政策组合在需求拉动与技术推动之间达到平衡时，生态创新的积极效应更为显著[7]。而 Fabrizio 等通过对多个国家能源存储技术专利的分析发现，需求拉动型政策显著增加了国外技术的引入，供给推动型政策对技术转移的影响较小[8]。

目前，学界将环境规制的政策工具分为命令控制型和市场激励型两类。有学者认为，市场激励型规制更能有效推动绿色技术创新并促进经济增长。范丹等使用动态面板平滑转移模型(PSTR)分析了中国 30 个省份的数据，发现市场激励型规制比命令控制型规制更能有效促进绿色技术创新，推动绿色经济发展[9]。碳交易市场是典型的市场激励型规制手段，BONNIN 等研究发现，政府的政策调整对企业行为有显

著影响，特别是在补贴和罚款机制并存的情况下，企业更倾向于选择减排策略[10]。与此同时，BOONS等通过对中国碳排放交易市场中政府、发电企业和市场的互动分析发现，较强的政府监管和补贴能够促使企业采取合作策略，最终实现稳定的减排路径[11]。

政策激励和补贴作为市场型环境规制的重要工具，已经成为了学术研究的热门话题。Cai等指出，直接环境规制显著促进了绿色技术创新，特别是在国有企业中，环境规制的推动效果更为明显，尤其是在技术资本密集型行业[12]。Jiang等通过对新能源汽车试点城市政策的分析，发现虽然政府补贴推动了新能源汽车技术创新数量上的增长，但未能显著提高创新的质量和效率[13]。Song等的研究还显示，环境规制与绿色产品创新呈现“U”型关系，随着规制力度的增加，创新从抑制转为促进作用[14]。与此同时，研发税收优惠在推动企业绿色技术创新方面也发挥了重要作用，特别是在激励企业投资方面具有显著效果。Zheng等研究进一步证明，环境税和研发税收优惠的协同效应能更有效地推动企业绿色创新的发展[15]。

消费者通过购买行为形成市场需求，基于绿色偏好对产品市场前景存在关键影响，进而推动企业的创新决策。关于绿色偏好的形成机制，李大林等引入自我决定理论，通过实验发现广告目标框架与调节定向之间存在着匹配效应[16]；Liu等认为揭示产品绿色属性信息有助于突出异于替代品的环保属性，进而提升消费者绿色偏好[17]。关于影响因素，吴波等认为影响消费者绿色偏好的影响因素可以归为个人因素和社会因素，两类因素通过影响消费者的自我担当对消费者偏好产生影响[18]；刘紫瑶等认为在电子商务环境下，产品、服务、信息质量和价格均显著影响购前决策行为[19]。

通过对现有文献的梳理可以看出，目前研究集中在绿色技术创新的影响因素、区域和企业绩效的关系，以及政策选择对参与方策略选择的影响。然而，消费者系统中的作用相对较少被关注。基于此，本文将通过构建政府-企业-消费者绿色技术创新系统，探讨消费者补贴和企业研发补贴等政策工具对系统演化的影响。

2. 问题描述与模型假设

2.1. 问题描述

绿色技术创新系统由政府、企业和消费者组成，三者相互作用关系如图1所示。在“碳达峰、碳中和”背景下，政府对企业生产技术及排放标准进行政策要求，而企业为保证经营效益需要在生产技术的选用上有所取舍，可基于传统技术进行开发创新，降低成本提高利润从而满足市场需要，也可开发绿色技术以满足排放要求和消费者需求。作为消费者，除产品的基本效用外，价格补贴和逐渐兴起的绿色产品生态也将影响产品感知价值，从而影响决策[20]。

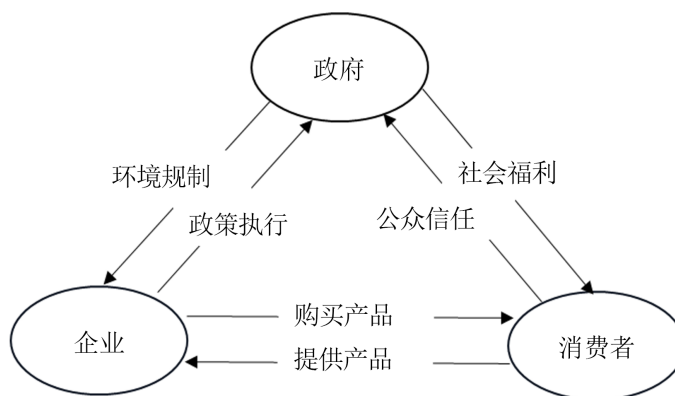


Figure 1. Interactions within the green technology innovation system
图 1. 绿色技术创新系统相互作用关系

2.2. 模型假设

假设 1: 在绿色技术创新系统中的每种行为主体都表现出有限理性, 即政府、企业和消费者三种博弈主体根据可用信息做出最佳决策, 但这些决策可能由于信息不完全、认知偏差等因素而不是全局最优。政府、企业和消费者之间的互动构成了一个动态演化的过程, 其中每方的策略选择和调整都会影响其他主体的行为和最终的系统均衡。

假设 2: 政府部门在绿色创新技术创新系统中起监管和引导的作用, 其策略集合为{强监管, 弱监管}。政府通过税收、补贴和监管政策等来促进绿色技术创新和绿色消费, 同时最大化公共福利。参考苏妮娜等的研究[21], 政府不受企业和消费者策略变化的收益部分为 R_1 。当政府采取强监管策略时, 参考汪明月等的研究, 对消费者产生了绿色消费意识的积极引导作用增加了消费者对政府环境治理的信任程度, 从而产生的额外收益 R_3 , 而强监管措施下政府重视企业技术选择和环境治理对消费者产生了福利增加额 R_2 [22]。

强监管措施下, 政府将付出额外的监管成本 C_m , 如果企业仍然选择传统生产技术, 政府将对企业进行惩罚 W , 反之, 如果企业开发绿色技术将获得政府补贴 S_1 , 如果消费者选择购买绿色产品将获政府补贴 S_2 。

假设 3: 企业在绿色技术创新系统中作为创新主体和产品供给方, 其策略集合为{绿色技术, 传统技术}。假设企业绿色产品和传统产品的收益为分别为 P_1 和 P_2 。企业生产传统产品的成本为 C_b , 而绿色产品相较于传统产品需要花费额外的研发和生产成本占比为 P_r , 绿色产品相较于传统产品价格更高, 并且在供给端产生的溢出价值能够为消费者带来福利增量 B 。

假设 4: 消费者在绿色技术创新系统中通过结合自身风险和损失偏好, 追求个人福利最大化, 决定是否购买绿色产品, 其策略集合为{绿色产品, 传统产品}。

3. 演化博弈模型求解及分析

根据上述假设和参数, 依据博弈论支付矩阵分布, 可得出绿色技术创新博弈系统主体间 8 种策略组合, 见表 1。

Table 1. Government-enterprise-consumer game system payoff matrix
表 1. 政府 - 企业 - 消费者博弈系统收益矩阵

| 政府 | 强规制 x | | 弱规制 $1 - x$ | |
|----|-------------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------|
| | 消费者 | | 消费者 | |
| | 绿色产品 z | 传统产品 $1 - z$ | 绿色产品 z | 传统产品 $1 - z$ |
| 企业 | $R_1 + R_3 - C_m - S_1 - S_2$ | $R_1 + R_3 - C_m - S_1$ | R_1 | R_1 |
| | $P_1 - C_b * (1 + P_r) + S_1$ | $-C_b * (1 + P_r) + S_1$ | $P_1 - C_b * (1 + P_r)$ | $-C_b * (1 + P_r)$ |
| | $V_1(U_1) + R_2 + S_2 + B$ | $V_2(U_2) + R_2 + B$ | $V_1(U_1) + B$ | $V_2(U_2) + B$ |
| | $R_1 + R_3 - C_m - C_e - S_2$ | $R_1 + R_3 - C_m - C_e$ | $R_1 - C_e$ | $R_1 - C_e$ |
| | $-C_b - W$ | $P_2 - C_b - W$ | $-C_b$ | $P_2 - C_b$ |
| | $V_1(U_1) + R_2 + S_2$ | $V_2(U_2) + R_2$ | $V_1(U_1)$ | $V_2(U_2)$ |

3.1. 演化博弈模型构建

本文假设政府进行强监管的概率为 x , 进行弱监管的概率为 $1 - x$, 企业使用绿色技术进行生产的概

率为 y ，使用传统技术进行生产的概率为 $1-y$ ，消费者选择购买绿色产品的概率为 z 。选择购买非绿色产品的概率为 $1-z$ 。其中， x 、 y 、 z 均为关于时间 t 的函数。

因此政府进行强监管的收益为：

$$U_{11} = R_1 - C_m - C_e + R_3 + W + C_e * y - S_1 * y - S_2 * z - W * y \quad (1)$$

政府进行弱监管的收益为：

$$U_{12} = R_1 - C_e + C_e * y \quad (2)$$

综上，政府的混合策略收益为：

$$U = x * U_{11} + (1-x) * U_{12} \quad (3)$$

政府部门的复制动态方程为：

$$\begin{aligned} F_G(x) &= dx/dt = x(U_{11} - U_1) = x(1-x)(U_{11} - U_{12}) \\ &= x * (x-1) * (C_m - R_3 - W + S_1 * y + S_2 * z + W * y) \end{aligned} \quad (4)$$

企业在绿色技术创新选择过程中选择采用绿色技术生产的收益为：

$$U_{21} = P_1 * z - C_b + S_1 * x - C_b * P_r \quad (5)$$

企业在绿色技术创新选择过程中选择采用传统技术生产的收益为：

$$U_{22} = P_2 - C_b - P_2 * z - W * x \quad (6)$$

综上，企业的混合策略收益为：

$$U = x * U_{21} + (1-x) * U_{22} \quad (7)$$

企业部门的复制动态方程为：

$$\begin{aligned} F_E(y) &= dy/dt = y(U_{21} - U_2) = y(1-y)(U_{21} - U_{22}) \\ &= -y * (y-1) * (P_1 * z - P_2 + P_2 * z + S_1 * x + W * x - C_b * P_r) \end{aligned} \quad (8)$$

消费者在购买产品时选择绿色产品的收益是：

$$\begin{aligned} U_{31} &= B * y + R_2 * x + y * V_1(U_1) + S_2 * x * y \\ U_{32} &= V_2(U_2) + B * y + R_2 * x - y * V_2(U_2) - R_2 * x * y \end{aligned} \quad (9)$$

综上，消费者的混合策略收益为：

$$U = x * U_{31} + (1-x) * U_{32} \quad (10)$$

消费者部门的复制动态方程为：

$$\begin{aligned} F_C(z) &= dz/dt = z(U_{31} - U_3) = z(1-z)(U_{31} - U_{32}) \\ &= -z * (z-1) * (y * V_1(U_1) - V_2(U_2) + y * V_2(U_2) + R_2 * x * y + S_2 * x * y) \end{aligned} \quad (11)$$

3.2. 博弈演化路径分析

3.2.1. 政府策略选择演化路径分析

对政府的策略均衡进行稳定性分析，结果见图2。政府的复制动态方程为：

$F(x) = x * (x-1) * (C_m - R_3 - W + S_1 * y + S_2 * z + W * y)$ ，对 $F(x)$ 求导得：

$H(x) = dF(x)/dx = (2x-1) * (C_m - R_3 - W + S_1 * y + S_2 * z + W * y)$ 。

若 $(C_m - R_3 - W + S_1 * y + S_2 * z + W * y) = 0$ ，即 $z = -(C_m - R_3 - W + S_1 * y + W * y)/S_2$ ，令 $F(x) = 0$ ，无

论 x 取何值, 政府的策略选择处于稳定状态。

若 $(C_m - R_3 - W + S_1 * y + S_2 * z + W * y) \neq 0$, 0 即 $z = -(C_m - R_3 - W + S_1 * y + W * y) / S_2$, 令 $F(x) = 0$, 得 $x_1 = 0$, $x_2 = 1$ 为政府策略两个稳定状态。

根据演化博弈稳定策略的性质可知, 要使政府达到稳定演化策略, 需满足 $H(x) < 0$, 此时对 $(C_m - R_3 - W + S_1 * y + S_2 * z + W * y)$ 的不同情况进行分析:

1) 当 $C_m - R_3 - W + S_1 * y + S_2 * z + W * y > 0$ 时, $F_{xx}|_{x=0} < 0$, $F_{xx}|_{x=1} > 0$

此时 $X = 0$ 为演化的稳定点, 即政府倾向于实施弱监管政策。

2) 当 $C_m - R_3 - W + S_1 * y + S_2 * z + W * y < 0$ 时, $F_{xx}|_{x=0} > 0$, $F_{xx}|_{x=1} < 0$

此时 $X = 1$ 为演化的稳定点, 即政府倾向于实施强监管政策。

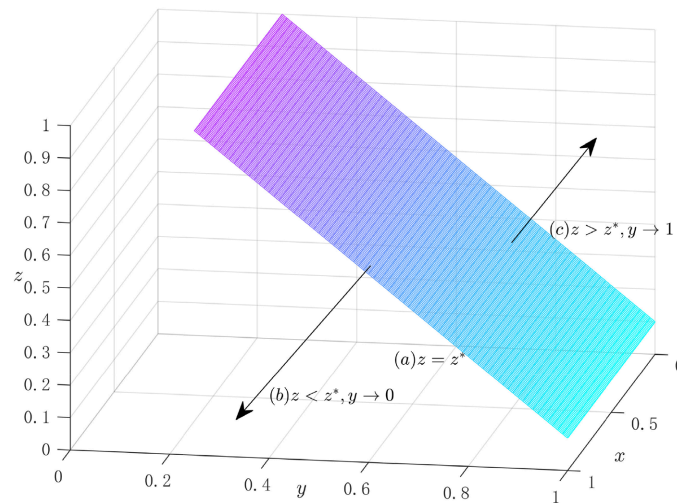


Figure 2. Evolutionary phase diagram of government strategies
图 2. 政府策略演化相位图

3.2.2. 企业策略选择演化路径分析

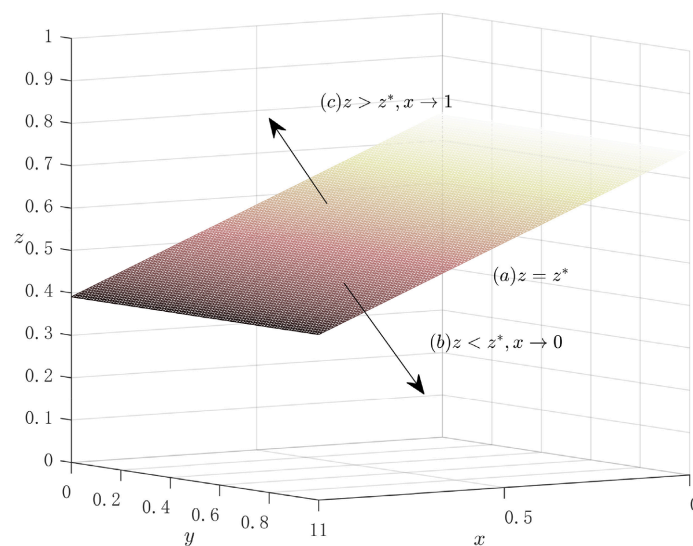


Figure 3. Evolutionary phase diagram of enterprise strategies
图 3. 企业策略演化相位图

对企业的策略均衡进行稳定性分析, 结果见图3。企业的复制动态方程为:

$F(y) = -y(y-1)(P_1z - P_2 + P_2z + S_1x + Wx - C_bP_r) = 0$, 对 $F(y)$ 求导得:

$$H(y) = dF(y)/dy = -(2y-1)(P_1z - P_2 + P_2z + S_1x + Wx - C_bP_r)。$$

若 $P_1z - P_2 + P_2z + S_1x + Wx - C_bP_r = 0$, 即 $z = (P_2 - S_1x - Wx + C_bP_r)/(P_1 + P_2)$, 令 $F(y) = 0$, 无论 z 取何值, 企业的策略选择处于稳定状态。

若 $P_1z - P_2 + P_2z + S_1x + Wx - C_bP_r \neq 0$, 即 $z \neq (P_2 - S_1x - Wx + C_bP_r)/(P_1 + P_2)$, 令 $F(y) = 0$, 得 $y_1 = 0$, $y_2 = 1$ 为企业策略两个稳定状态。

根据演化博弈稳定策略的性质可知, 要使政府达到稳定演化策略, 需满足 $H(y) < 0$, 此时对 $P_1z - P_2 + P_2z + S_1x + Wx - C_bP_r$ 的不同情况进行分析:

1) 当 $P_1z - P_2 + P_2z + S_1x + Wx - C_bP_r > 0$ 时, $F_{yy}|_{y=1} < 0$, $F_{yy}|_{y=0} > 0$ 。此时 $y=1$ 为演化稳定点, 即企业倾向于开发绿色技术进行生产。

2) 当 $P_1z - P_2 + P_2z + S_1x + Wx - C_bP_r < 0$ 时, $F_{yy}|_{y=1} > 0$, $F_{yy}|_{y=0} < 0$ 。此时 $y=0$ 为演化的稳定点, 即企业倾向于沿用传统技术进行生产。

3.2.3. 消费者策略选择演化路径分析

对消费者的策略均衡进行稳定性分析, 方法同上, 结果见图4。

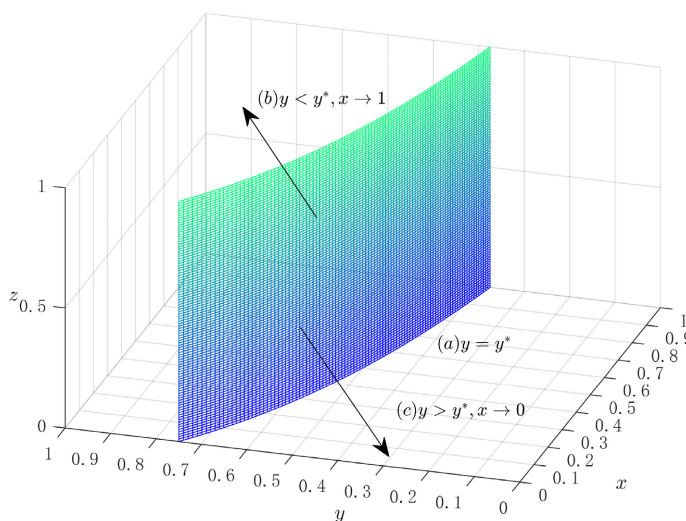


Figure 4. Evolutionary phase diagram of consumer strategies

图4. 消费者策略演化相位图

$F_{zz} = -(2z-1)(yV_1(U_1) - V_2(U_2) + yV_2(U_2) + R_2x*y + S_2x*y)$ 。若 $y = V_2(U_2)/(V_1(U_1) + V_2(U_2) + R_2x + S_2x)$, 消费者处于稳定状态。若 $y \neq V_2(U_2)/(V_1(U_1) + V_2(U_2) + R_2x + S_2x)$, $z=0$ 或 $z=1$ 。

讨论:

1) $yV_1(U_1) - V_2(U_2) + yV_2(U_2) + R_2x*y + S_2x*y > 0$ 时, $F_{zz}|_{z=1} < 0$, $F_{zz}|_{z=0} > 0$ 。 $z=1$ 时为稳定点。消费者策略是选择绿色产品。

2) $yV_1(U_1) - V_2(U_2) + yV_2(U_2) + R_2x*y + S_2x*y < 0$ 时, $F_{zz}|_{z=1} > 0$, $F_{zz}|_{z=0} < 0$ 。 $z=0$ 时为稳定

点。消费者策略是选择传统产品。

4. 演化稳定策略分析

整理式(4)(8)(11), 可得政府、企业和消费者的复制动态方程。Friedman 指出, 通过求解复制动态方程的雅可比矩阵的局部稳定性, 可以得到复制动态方程的演化均衡解[23]。

根据李亚普洛夫第一法则判断各纯策略均衡点是否演化稳定点, 当且仅当某一均衡点的所有特征值为负时, 该点为局部稳定点 ESS, 当均衡点存在特征值为正或等于 0 时, 该点为不稳定点, 见表 2。

$$\begin{bmatrix} (2x-1)(C_m-R_3+S_1y+S_2z) & S_1x(x-1) & S_2x(x-1) \\ -y(S_1+W)(y-1) & -(2y-1)(P_1z-P_2+P_2z+S_1x+Wx-C_bP_r) & -y(P_1+P_2)(y-1) \\ -yz(R_2+S_2)(z-1) & -y(P_1+P_2)(y-1) & -(2z-1)(yV_1(U_1)-V_2(U_2)+yV_2(U_2)+R_2xy+S_2xy) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Table 2. Equilibrium point and eigenvalues

表 2. 均衡点及特征值

| 均衡点 | 特征值 | | | 特征值正负性 |
|--------------|-----------------------------|-------------------|---------------------|-----------|
| | λ_1 | λ_2 | λ_3 | |
| $E_1(0,0,0)$ | $-P_2-C_b * P_r$ | R_3-C_m+W | $-V_2(U_2)$ | $(-, -)$ |
| $E_2(0,0,1)$ | $P_1-C_b * P_r$ | $R_3-C_m-S_2+W$ | $V_2(U_2)$ | $(, , +)$ |
| $E_3(0,1,0)$ | $P_2+C_b * P_r$ | $R_3-C_m-S_1$ | $V_1(U_1)$ | $(+, +)$ |
| $E_4(0,1,1)$ | $C_b * P_r - P_1$ | $R_3-C_m-S_1-S_2$ | $-V_1(U_1)$ | $(, , -)$ |
| $E_5(1,0,0)$ | $S_1-P_2+W-C_b * P_r$ | C_m-R_3-W | $-V_2(U_2)$ | $(-, -)$ |
| $E_6(1,0,1)$ | $P_1+S_1+W-C_b * P_r$ | $C_m-R_3+S_2-W$ | $V_2(U_2)$ | $(, , +)$ |
| $E_7(1,1,0)$ | $P_2-S_1-W+C_b * P_r$ | $C_m-R_3+S_1$ | $R_2+S_2+V_1(U_1)$ | $(, , +)$ |
| $E_8(1,1,1)$ | $C_b * P_r - S_1 - W - P_1$ | $C_m-R_3+S_1+S_2$ | $-R_2-S_2-V_1(U_1)$ | $(, , -)$ |

通过判断特征值正负, 仅 E_1 、 E_4 、 E_5 、 E_8 可能是局部均衡稳定点, 在此基础上讨论参数的取值范围, 有以下推论:

推论 1:

当满足:

$$C_b * P_r - S_1 - W - P_1 < 0 \quad (13)$$

$$C_m - R_3 + S_1 + S_2 < 0 \quad (14)$$

$$S_1 - P_2 + W - C_b * P_r > 0 \quad (15)$$

时仅有 E_8 一个稳定点。

均衡条件 1: 需满足企业生产绿色产品的收益大于政府对企业生产传统产品的惩罚。从政府调控的角度看, 为达到均衡条件政府需要负担相比惩罚力度更高的企业补贴水平以鼓励企业开发绿色技术, 符合该种均衡下政府的调控策略。此外, 政府的惩罚力度还存在下限, 确保环境规制的警示力度。

均衡条件 2: 政府强监管时付出的监管成本, 与政府对企业 and 消费者生产、采用绿色产品的补贴之和, 应当小于强监管对消费者的消费激励给政府带来的额外税收。即消费者已经建立绿色消费意识, 对绿色消费激励政策敏感并积极做出反馈。

满足以上条件时, $E_8(1,1,1)$ 为系统的稳定点, 此时政府、企业、消费者的策略组合是{强监管, 绿色技术, 绿色产品}。结合现实情况考虑, 在“双碳”目标下, 政府会大力扶持绿色技术发展, 进行绿色技

术创新政策引导和资金支持,在此状态下,企业更倾向于“研发绿色技术”策略,而消费者更偏好于绿色创新产品,即博弈系统最终收敛到 $E_8(1,1,1)$ 。由于我国目前绿色技术市场的发展水平和创新主体参与积极性水平不高,政府的扶持是必不可少的,碳排放约束机制有利于引导企业研发和刺激消费者购买欲望,达到完全竞争市场,促使绿色技术创新市场供需平衡。

推论 2:

当满足:

$$C_b * P_r - S_1 - W - P_1 < 0 \quad (16)$$

$$S_1 - P_2 + W - C_b * P_r < 0 \quad (17)$$

时存在 E_5 和 E_8 两个稳定点。

在满足推论 1 中条件(1)、(3)基础上,政府虽然为企业绿色转型提供了足额补贴,但对企业使用传统技术生产的惩罚力度不足,企业在转型升级和因循守旧中选择了后者,相比开发绿色技术的高风险、高成本,采用传统技术、扩大再生产、保持价格优势、薄利多销对企业经营更加有利。

满足以上条件时, $E_5(1,0,0)$ 和 $E_8(1,1,1)$ 均有可能成为稳定点。即政府、企业、消费者的策略组合为 {强监管, 传统技术, 传统产品}, {强监管, 绿色技术, 绿色产品}。在企业经营产生一定收益情况下,政府补贴和惩罚是决定系统局部稳定的关键因素。

推论 3:

当满足:

$$C_b * P_r - P_1 < 0 \quad (18)$$

$$R_3 - C_m - S_1 - S_2 < 0 \quad (19)$$

政府为维持强监管政策预期支出成本之和,包括对企业的监管成本,以及对企业和消费者的补贴成本,大于消费者在享受环境改善等社会福利下增加对政府的信心与支持。

从此分类讨论:

情形 1: 满足前两个条件及 $R_3 - C_m + W < 0$ 时, 存在 ESS 点 $(0,0,0), (0,1,1)$ 。政府出于强环境规制预期投入过高、财政压力或民众支持动力不足的情况下选择弱监管策略。当政府预期的监管成本,除去对企业传统生产的罚金外,相对未来民众支持过高的情况下,系统均衡还有可能陷入 {弱监管, 传统技术, 传统产品} 的消极局面,从需求侧分析,即消费者对政府环境规制的信心不足,同时绿色产品的定价过高,以致消费者不愿尝试绿色产品。由于需求侧动力不足,企业不愿冒险承担技术开发和产线升级的额外成本,叠加政府监管成本较高,绿色技术创新系统进入恶性循环。

情形 2: 满足前两个条件及 $C_m - R_3 - W < 0$ 、 $S_1 - P_2 + W - C_b * P_r < 0$ 时, 存在 ESS 点 $(0,1,1), (1,0,0)$ 。当政府采取足够高的罚金,企业生产传统产品可能产生的机会收益仍大于政府对绿色生产的补贴,即使在缴纳罚金的情况下企业仍能获得可观的利润。此时绿色技术创新系统可能进入 {强监管, 传统技术, 传统产品} 的无效做功阶段。

情形 3: 仅满足 $C_b * P_r - P_1 < 0$ 、 $R_3 - C_m - S_1 - S_2 < 0$ 时, 仅存在 ESS 点 $(0,1,1)$ 。对企业而言,仅当绿色转型相对成熟,产品量大质优,生产绿色产品的边际效益不断扩大,并履行社会责任为社会公众带来行业标准、环境整顿等溢出效应时,绿色技术创新系统无需政府干预进入供需匹配的良性循环,从而进入 {弱监管, 绿色技术, 绿色产品}。

5. 数值模拟

为检验绿色技术创新系统演化均衡稳定分析的有效性,使用 Matlab2020a 对系统进行建模,并结合

实际情况根据系统假设进行参数赋值和数值模拟。理想情况下,绿色技术创新系统参数应满足推论 1。

数组 1: $R_1 = 10$, $R_2 = 10$, $R_3 = 15$, $S_1 = 3$, $S_2 = 2$, $P_r = 0.2$, $C_b = 10$, $C_m = 4$, $C_e = 5$, $P_1 = 8$, $P_2 = 10$, $W = 10$, $B = 2$, $V_1 = 8$, $V_2 = 2$ 。能够满足上述条件,使系统演化至政府严格监管,企业采用绿色生产,消费者购买绿色产品。

5.1. 不同初始策略概率对演化轨迹的影响

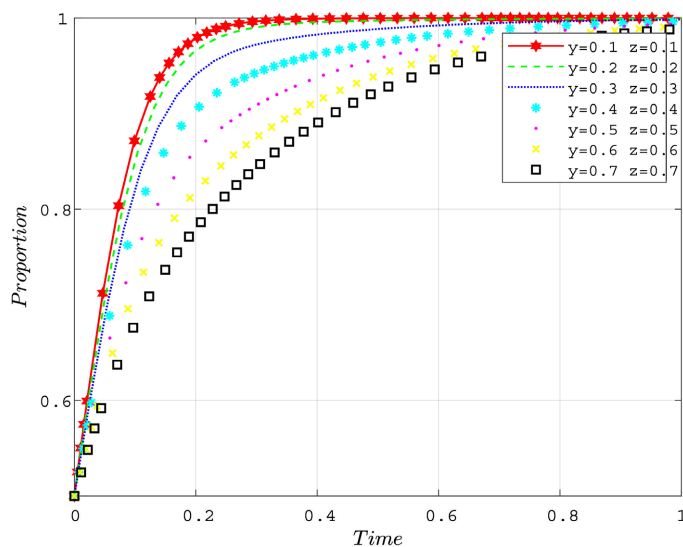


Figure 5. Evolutionary trajectory of government strategies under changes in y and z

图 5. y 与 z 变化下政府策略演化轨迹

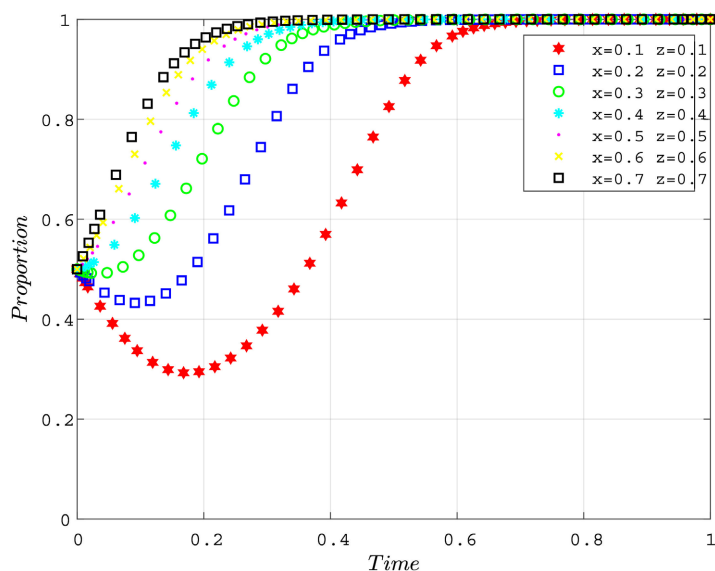


Figure 6. Evolutionary trajectory of enterprise strategies under changes in x and z

图 6. x 与 z 变化下企业策略演化轨迹

根据上述条件,假设政府策略选择强监管的初始概率为 0.5,企业和消费者选取从 0.1 至 0.7 的初始概率组合,得到政府策略演化轨迹见图 5。由图可知,在上述参数假设下,政府最终均演化至实施“强监管”策略, y 和 z 的初始概率将影响系统演化至局部均衡的速度。即企业和消费者接受绿色技术和绿色产

品的初始概率越低,政府向强监管政策演化的速度越快,说明在合适的市场条件下,政府对于消极市场中供需双方的推动速度高于积极市场,在企业和公众对于绿色转型存疑时政府对市场转变起到重要的推动作用。

同理,假设企业策略选择采用绿色技术的初始概率为 0.5,政府和消费者选取从 0.1 至 0.7 的初始概率组合,得到企业策略演化轨迹见图 6。由图可知,在上述参数假设下,企业最终均演化至“采取绿色技术”策略, x 和 z 的初始概率将影响系统演化至局部均衡的速度。即企业和消费者接受绿色技术和绿色产品的初始概率越高,政府向强监管政策演化的速度越快;当 x 和 z 初始概率较低时,企业先向采取传统技术方向演化。当企业的市场判断错误,即企业生产绿色产品但消费者不买账时,企业将承担巨大的风险,因此政府和消费者绿色转型的初始意愿低迷将对企业产生震慑作用,随着政府和消费者意愿提高,企业最终将“采取绿色技术”策略。

假设消费者策略选择采用绿色技术的初始概率为 0.5,政府和企业选取从 0.1 至 0.7 的初始概率组合,得到消费者策略演化轨迹见图 7。由图可知,在上述参数假设下,消费者最终均演化至“购买绿色产能品”策略, x 和 y 的初始概率将影响系统演化至局部均衡的速度。即政府和企业采取强监管和接受绿色技术概率越高,消费者向强监管政策演化的速度越快;当 x 和 y 初始概率较低时,消费者先向传统产品方向演化。消费者选择绿色和传统产品时也将面临高昂的机会成本,因此政府和企业绿色转型的初始意愿低迷时消费者对绿色产品态度将更为谨慎,随着政府和企业转型意愿提高,消费者最终将“选择绿色产品”策略。

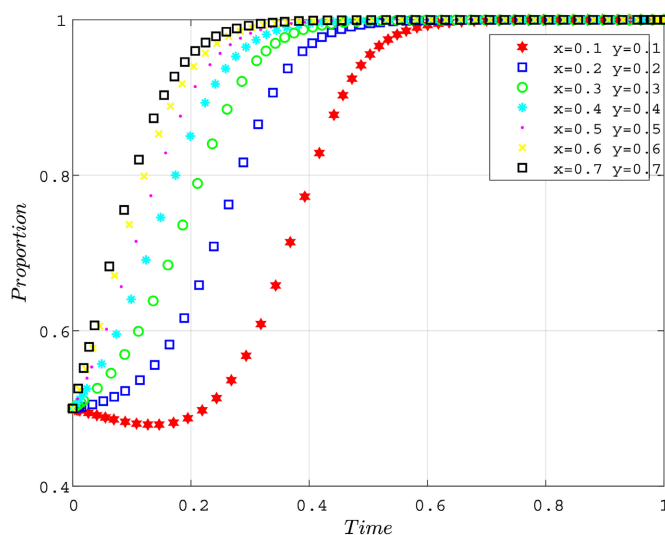


Figure 7. Evolutionary trajectory of consumer strategies under changes in x and y
图 7. x 与 y 变化下消费者策略演化轨迹

5.2. 政府对企业补贴对演化轨迹影响

在数组 1 规定的原始参数设置下,设定 x 、 y 、 z 的初始值为(0.5 0.5 0.5),通过改变 S_1 参数取值以探讨政府对企业补贴力度对企业和消费者策略演化轨迹的影响,结果见图 8、图 9。由图可知,如推论 1, S_1 大于 2 时,补贴力度 S_1 增大对企业和消费者演化至{绿色技术,绿色产品}起促进作用,随 S_1 增大, y 、 z 向 1 演化速度加快。当 S_1 继续提升至 10 以上,如推论 3, x 转而向 0 演化,系统将稳定于(011)。如推论 2, S_1 小于 2 时存在(111)(100)两个均衡点, x 、 y 、 z 的初始值为(0.5 0.5 0.5)时, yz 仍向(111)方向演化,当 x 、 y 、 z 的初始值为(0.1 0.1 0.1)时, yz 转而向(100)演化。即政府对企业补贴处于高水平时,补贴力度

与系统演化速度呈正相关, 当补贴力度高于某阈值时, 政府因补贴开支过高转向弱监管, 系统将稳定于 ESS4, 此时市场无需政府干预形成供需匹配的高效循环; 当补贴力度低于某阈值时, 系统均衡稳定结果由企业与企业采取绿色技术创新的初始意愿有关, 当其两方初始意愿高于某阈值时系统将稳定与 ESS8, 否则稳定于 ESS5。

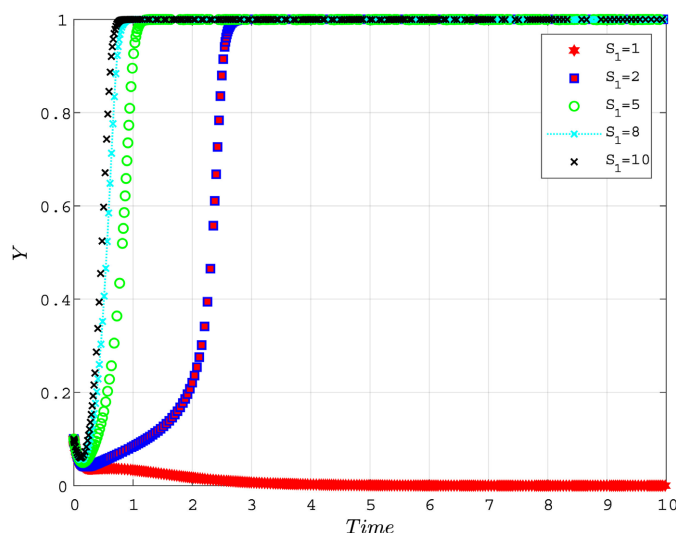


Figure 8. Evolutionary trajectory of enterprise strategies under different subsidy levels
图 8. 不同补贴力度下企业策略演化轨迹

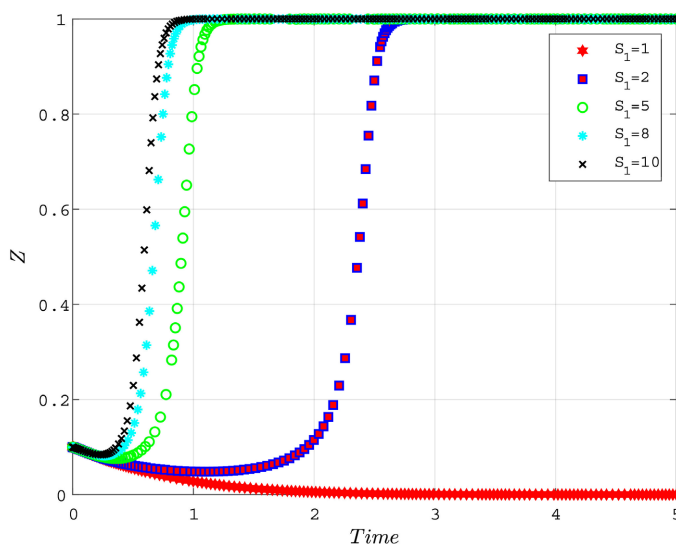


Figure 9. Evolutionary trajectory of consumer strategies under different subsidy levels
图 9. 不同补贴力度下消费者策略演化轨迹

5.3. 政府对消费者补贴对演化轨迹影响

在数组 1 规定的原始参数设置下, 设定 x 、 y 、 z 的初始值为(0.5 0.5 0.5), 通过改变 S_2 参数取值以探讨政府对消费者补贴力度对企业策略演化轨迹的影响, 结果如图 10 所示。由图可知, S_2 小于 8 时, 随着补贴力度 S_1 增大, 政府演化至{强监管}的速度减慢, 当 S_2 继续提升至 10 以上, x 转而向 0 演化, 系统将稳定于(011)。即政府对企业补贴处于高水平时, 补贴力度与系统演化速度呈负相关。在政府、企业、消

费者处于{强监管, 绿色技术, 绿色产品}的基准情形下讨论, 由图发现当系统走上市场绿色转型的初始阶段时, 高水平的需求侧补贴会给政府带来高昂的成本, 当政府的补贴成本超出预期时, 政府将转为{弱监管}策略, 而系统将会进入{弱监管, 绿色技术, 绿色创新}的良性循环; 反之如果消费者补贴处于较低水平, 系统将维持{强监管, 绿色技术, 绿色创新}状态, 市场绿色转型将会对政府补贴形成依赖。

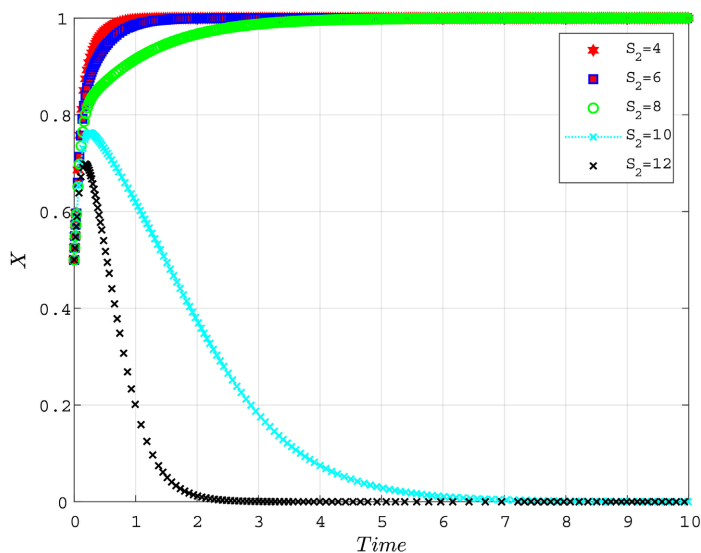


Figure 10. Evolutionary trajectory of government strategies under different subsidy levels

图 10. 不同补贴力度下政府策略演化轨迹

5.4. 政府惩罚力度演化轨迹影响

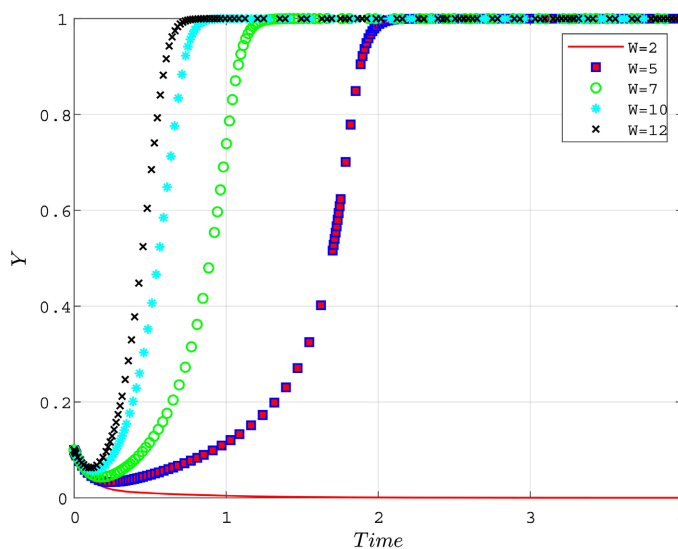


Figure 11. Evolutionary trajectory of enterprise strategies under different penalty levels

图 11. 不同惩罚力度下企业策略演化轨迹

在原始参数设置下, 设定 x 、 y 、 z 的初始值为(0.1 0.1 0.1), 改变 W 参数取值以探讨政府对企业惩罚力度对企业和消费者策略演化轨迹的影响, 结果如图所示。由图 11、图 12 可知, 如推论 1, W 大于 5 时, 惩罚力度增大对企业和消费者演化至{绿色技术, 绿色产品}起促进作用, 随 W 增大, y 、 z 向 1 演化速度

加快。当 W 取值为 2 时, y 、 z 转而向 0 演化, 系统将稳定于 $(1,0,0)$ 。但当企业、消费者绿色转型的初始意愿较高时, 系统演化受初值影响仍将稳定于 $(1,1,1)$, 即企业和消费者对于绿色转型意愿较低时, 政府对企业惩罚力度处于高水平, 惩罚力度与系统演化速度呈正相关, 惩罚力度低于某阈值时, 企业可能处于侥幸心理选择传统技术生产, 系统将稳定于 ESS5, 此时政府对市场绿色转型的引导力度, 或对企业的震慑力度不足, 绿色技术创新系统陷入低效循环; 企业和消费者对于绿色转型意愿处于高水平时, 企业对于市场需求的乐观判断和消费者对于产品的绿色偏好使得{强监管, 绿色技术, 绿色产品}的系统均衡具有稳健性。

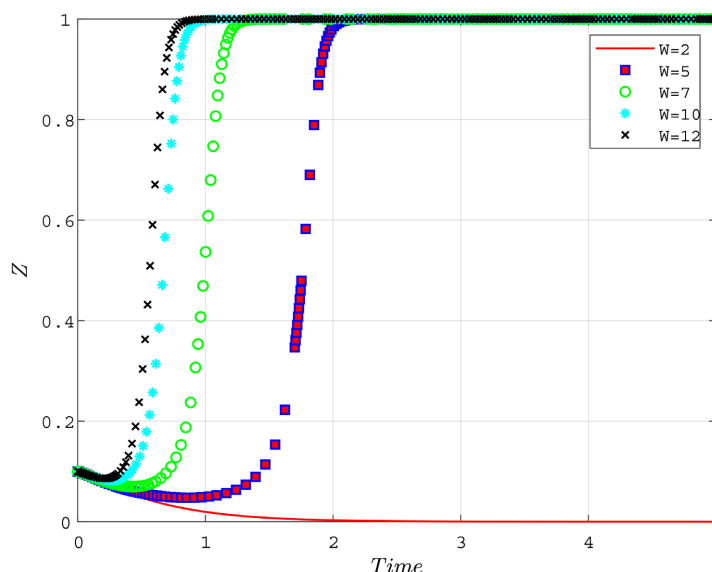


Figure 12. Evolutionary trajectory of consumer strategies under different penalty levels
图 12. 不同惩罚力度下消费者策略演化轨迹

6. 结论

本文通过构建演化博弈模型讨论了绿色技术创新系统中政府、企业、消费者之间的相互作用机制, 探讨了策略稳定性及影响因素, 最后通过 matlab2018a 中 ode45 求解器对演化路径和均衡点进行仿真, 得出以下结论: 第一, 不同条件下政府、企业、消费者的均衡结果不同, 在绿色技术创新系统中消费者往往是被影响的。影响均衡稳定结果的参数包括政府对企业和消费者的补贴力度、对企业采用传统技术生产的惩罚力度、强监管时的监管成本、企业生产两种产品分别获得的收益、使用绿色技术的额外生产成本、消费者对两种产品的效用感知, 以及政府、企业和消费者策略选择的初始意愿。第二, 政府可通过调整两项补贴和一项惩罚力度对企业和消费者施加影响, 通过企业供给侧调整实现{强监管, 绿色技术, 绿色产品}均衡, 但均衡对政府干预存在依赖。当系统达到政府强监管下的绿色化转型后, 需结合政府和企业策略选择的初始意愿调整政府对企业的补贴力度和惩罚力度, 否则会走向政府强监管下市场拒绝配合的被动局面。为达到无需政府干预的绿色市场, 政府退出干预的正确方式是当三者对于系统绿色转型均处于高意愿时抬高企业补贴至超过阈值, 从而打破系统对政府干预的依赖。当系统对绿色转型怀有较低意愿时, 政府通过降低补贴和惩罚力度来逐渐减弱对系统的影响, 这样的方式退出系统干预反而会走向传统产品市场。第三、企业应在政府支持下不断降本增效, 以供给驱动绿色市场转型。在政府奖罚兼施的政策干预下, 企业应抓住机遇加大绿色技术研发投入, 降低绿色产品生产的边际成本, 提高绿色产品的整体收益, 使消费者形成“物美、价廉、质优”的绿色偏好, 使市场进入供给推动、需求转型、供需

匹配的良性循环, 逐渐迈入绿色技术创新转型的深水区。

参考文献

- [1] 任保平. 新时代中国经济从高速增长转向高质量发展: 理论阐释与实践取向[J]. 学术月刊, 2018, 50(3): 66-74.
- [2] 肖静, 曾萍, 章雷敏. 地区数字化水平、绿色技术创新与制造业绿色转型[J]. 华东经济管理, 2023, 37(4): 1-12.
- [3] Liu, X. and Zhang, X. (2021) Industrial Agglomeration, Technological Innovation and Carbon Productivity: Evidence from China. *Resources, Conservation and Recycling*, **166**, Article 105330. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105330>
- [4] Chen, Y.-S., Lai, S.-B. and Wen, C.-T. (2006) The Influence of Green Innovation Performance on Corporate Advantage in Taiwan Region. *Journal of Business Ethics*, **67**, 331-339. <https://doi.org/10.1007/s10551-006-9025-5>
- [5] Kunapatarawong, R. and Martínez-Ros, E. (2016) Towards Green Growth: How Does Green Innovation Affect Employment? *Research Policy*, **45**, 1218-1232. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2016.03.013>
- [6] De Jesus, A. and Mendonça, S. (2018) Lost in Transition? Drivers and Barriers in the Eco-Innovation Road to the Circular Economy. *Ecological Economics*, **145**, 75-89. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.08.001>
- [7] Costantini, V., Crespi, F. and Palma, A. (2017) Characterizing the Policy Mix and Its Impact on Eco-Innovation: A Patent Analysis of Energy-Efficient Technologies. *Research Policy*, **46**, 799-819. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2017.02.004>
- [8] Fabrizio, K.R., Poczter, S. and Zelner, B.A. (2017) Does Innovation Policy Attract International Competition? Evidence from Energy Storage. *Research Policy*, **46**, 1106-1117. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2017.04.003>
- [9] 范丹, 孙晓婷. 环境规制、绿色技术创新与绿色经济增长[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(6): 105-115.
- [10] Bonnín Roca, J., Vaishnav, P., Morgan, M.G., Mendonça, J. and Fuchs, E. (2017) When Risks Cannot Be Seen: Regulating Uncertainty in Emerging Technologies. *Research Policy*, **46**, 1215-1233. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2017.05.010>
- [11] Boons, F., Montalvo, C., Quist, J. and Wagner, M. (2013) Sustainable Innovation, Business Models and Economic Performance: An Overview. *Journal of Cleaner Production*, **45**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.013>
- [12] Cai, X., Zhu, B., Zhang, H., Li, L. and Xie, M. (2020) Can Direct Environmental Regulation Promote Green Technology Innovation in Heavily Polluting Industries? Evidence from Chinese Listed Companies. *Science of the Total Environment*, **746**, Article 140810. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140810>
- [13] Jiang, Z. and Xu, C. (2023) Policy Incentives, Government Subsidies, and Technological Innovation in New Energy Vehicle Enterprises: Evidence from China. *Energy Policy*, **177**, Article 113527. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113527>
- [14] Song, M., Wang, S. and Zhang, H. (2020) Could Environmental Regulation and R&D Tax Incentives Affect Green Product Innovation? *Journal of Cleaner Production*, **258**, Article 120849. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120849>
- [15] Zheng, Q., Li, J. and Duan, X. (2023) The Impact of Environmental Tax and R&D Tax Incentives on Green Innovation. *Sustainability*, **15**, Article 7303. <https://doi.org/10.3390/su15097303>
- [16] 李大林, 余伟萍. 消费者绿色购买意向的形成机制研究——广告目标框架和调节定向的作用[J]. 南京工业大学学报(社会科学版), 2021, 20(1): 87-98+112.
- [17] Liu, J., Hull, V., Godfray, H.C.J., Tilman, D., Gleick, P., Hoff, H., et al. (2018) Nexus Approaches to Global Sustainable Development. *Nature Sustainability*, **1**, 466-476. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0135-8>
- [18] 吴波, 李东进, 谢宗晓. 消费者绿色产品偏好的影响因素研究[J]. 软科学, 2014, 28(12): 89-94.
- [19] 刘紫瑶, 胡若痴. 消费者绿色消费行为影响因素研究——以电子商务为视角[J]. 生态经济, 2022, 38(8): 60-67.
- [20] 武亮, 董莹铭, 周建华, 等. 碳排放约束下绿色技术创新供需双方的利益均衡博弈分析[J]. 生态经济, 2024, 40(5): 71-78.
- [21] 苏妮娜, 朱先奇, 高力平. 基于前景理论的协同创新机制研究[J]. 经济问题, 2020(3): 74-82.
- [22] 汪明月, 李颖明. 多主体参与的绿色技术创新系统均衡及稳定性[J]. 中国管理科学, 2021, 29(3): 59-70.
- [23] Friedman, D. (1991) Evolutionary Games in Economics. *Econometrica*, **59**, 637-666. <https://doi.org/10.2307/2938222>