



企业环境技术创新激励 政策优化组合模拟与分析

赵爱武^{1,2}, 关洪军¹

1 山东财经大学 管理科学与工程学院, 济南 250014

2 江苏大学 社会科学计算实验中心, 江苏 镇江 212013

摘要: 企业环境技术创新是实现经济可持续发展和环境保护双重目标的重要途径。由于环境技术创新的不确定性和双重外部性, 环境政策成为激励企业环境技术创新的重要驱动力。已有研究存在环境政策工具研究视角单一的问题, 难以反映政策组合中不同政策之间的相互作用对企业环境技术创新的影响。

基于社会科学计算实验方法, 构建企业环境技术创新动态仿真模型, 通过模拟不同环境政策情景下企业环境技术创新过程, 探索不同政策工具及其组合对企业环境技术创新行为的影响。首先, 介绍模型对应的现实场景, 在对现实场景抽象简化的基础上, 对模型中相关主体的属性、行为规则和交互规则进行详细描述, 说明模型的具体实现过程和相关参数; 其次, 根据研究问题的需要设置多种实验情景, 分别进行模拟实验; 最后, 分析实验结果。

研究表明, 由于环境创新产品的市场竞争力决定企业对环境创新技术的采用行为, 因此政策工具的制定应立足于促进环境创新技术的发展, 以提高创新产品的市场预期, 降低创新技术采用成本。在市场机制与企业竞争的共同作用下, 当环境创新产品市场竞争力较弱时, 单一的补贴政策对环境创新技术促进效果不明显, 应考虑多种政策工具的优化组合。严格的环境税费制度与环境创新产品价格补贴政策组合, 可有效促进企业环境技术创新, 但严格的环境税费制度在激励创新的同时, 可能增加企业负担, 因此在创新技术更替的过程中会有大量资金力量薄弱、技术落后的企业被淘汰; 宽松的环境税费制度与补贴环境创新产品市场的政策工具组合, 通过环境税费预期提高企业对环境创新技术的预期, 提前为技术更替做好准备, 从而可以在维持企业正常经营的前提下, 逐步促进企业环境技术创新, 完成新旧技术更替。

所构建的模型可以作为环境政策设计的参考工具, 通过设置政策情景并展开模拟实验, 分析其对企业环境技术创新行为的长短期影响。

关键词: 环境技术创新; 环境政策; 计算实验; 经济绩效; 环境绩效

中图分类号: F273.1

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1672-0334.2018.06.008

文章编号: 1672-0334(2018)06-0104-13

引言

日益严峻的环境问题促使人类社会考虑更环保

的经济增长方式, 而企业环境技术创新被视为解决一个生态问题同时不减少相关经济活动的

收稿日期: 2017-06-05 **修返日期:** 2018-02-13

基金项目: 国家社会科学基金(18VSJ038)

作者简介: 赵爱武, 工学博士, 山东财经大学管理科学与工程学院副教授、江苏大学社会科学计算实验中心成员, 研究方向为复杂系统建模和社会科学计算实验等, 代表性学术成果为“绿色购买行为演化路径与影响机理分析”, 发表在2015年第11期《中国管理科学》, E-mail: aiwuzh@126.com

关洪军, 工学博士, 山东财经大学管理科学与工程学院教授, 研究方向为管理科学理论与方法、电子商务和安全工程等, 代表性学术成果为学术专著《企业绿色技术创新行为研究》, 2017年由经济科学出版社出版 (ISBN 978-7-5141-7861-6), E-mail: jjxyghj@126.com

重要方式。因此,企业环境技术创新成为实现经济发展和环境保护双重目标的一条黄金道路。企业环境技术创新主要指企业面临来自政府、公众、消费者等出于对环境保护的压力,基于自身条件和竞争形势,在生产之前考虑的与环境有关的创新行为,如企业采用新的生产工艺(如发展清洁生产技术)或生产新的产品(如生产环保产品)以更好地保护环境等。企业积极采用环境创新技术替代高污染、高能耗的传统技术,不仅有利于根本解决环境问题,对于推进绿色发展同样具有重要意义。FANKHAUSER et al.^[1]结合专利数据以及国际贸易与输出数据研究发现,绿色竞赛可能改变目前的竞争力现状,许多当前有着较强优势的国家产业由于绿色转换能力落后于其他国家而失去竞争优势。因此,积极推动企业实施环境技术创新,对于赢得全球范围的绿色竞赛具有重大的战略意义。

然而,由于环境技术创新的不确定性和双重外部性,导致其对企业的私人回报小于社会回报。因此,完全由市场机制引导的企业环境技术创新必然小于社会最优水平,这就需要政府制定必要的政策以促进企业实施环境技术创新^[2],为此,国内外众多学者研究环境规制、创新激励、价格补贴等政策对企业环境技术创新的影响。一方面,很多学者认为环境规制增加企业成本,挤占资源,抑制技术创新;另一方面,以波特假说为代表的学者认为,设计合理的环境规制有助于引导企业提高资源利用效率,通过创新补偿效应发挥先动优势,激发企业创新动机,实现环境绩效与经济绩效的双赢^[3]。企业环境技术创新受资源和环境约束、市场需求、企业竞争、技术条件等复杂因素的共同影响,而政策的相互作用通常可以加强单个政策的影响,因此,从单一政策视角研究企业环境技术创新难以反映政策组合情景对创新过程的影响及政策相互作用的动态性^[4]。事实上,政策组合对经济发展造成的扭曲程度远远小于实施单一政策造成的经济损失^[5],单一政策视角的研究无法反映不同施政机构、具有不同侧重点的政策之间的相互作用。随着环境和创新相关政策颁布数量的不断增多,越来越多的学者开始重视政策间相互作用对企业环境技术创新的影响。基于政策组合视角研究企业环境技术创新的优化策略,既考虑单一政策的影响,又考虑不同政策间的相互影响,拓展环境创新领域政策研究的广度和深度,能够深入剖析不同政策组合对企业环境技术创新行为产生的深远影响。

1 相关研究评述

1.1 环境政策与企业环境技术创新的关系

学者们基于理论和实证研究认为,环境规制在企业环境技术创新活动中发挥着关键作用。张红凤等^[6]认为,正是由于环境保护与经济发展的两难、环境承载阈值和环境问题负外部性的存在,昭示了环境规制的必要性;KATSOUACOS et al.^[7]认为,只有在

环境规制的作用下,企业才会进行与环境技术创新有关的R&D活动。也就是说,企业环境技术创新是政策激励的结果,企业自身往往并不具备这种创新的动机。RENNINGS^[8]认为,尽管新古典环境经济学将需求拉动和技术推动作为影响企业环境技术创新的标准因素,但环境规制的推动和拉动作用在企业环境技术创新中扮演了更重要的角色,成为企业环境技术创新的重要决定因素之一。而关于环境规制和环境技术创新的理论和实证同样支持“政策驱动”环境技术创新的观点,这使环境规制不仅仅作为环境问题末端治理的执法依据,更成为企业环境技术创新的“助推器”。

然而,梁伟等^[9]认为,严厉的环境规制会给宏观经济带来一定的负面影响,单纯地征收环境税很难实现节能减排和经济增长的“双重红利”。事实上,环境规制与企业环境技术创新和绩效之间的关系受到规制类型、市场结构、产品竞争等因素的影响^[10]。李阳等^[11]研究发现,由于环境规制对技术创新能力的长短期效应具有明显的行业异质性,应从行业特点出发,制定差异化的环境规制。在促进企业环境技术创新方面,政府导向比市场导向更有利^[12],如政府可以通过复合型碳减排政策平衡减排与低碳效益之间的关系,以保护企业开展碳减排创新活动的积极性^[13]。

1.2 环境技术创新政策设计

环境规制与技术创新之间呈U形关系,设计良好的环境规制能够给予企业更多的创新激励,并使企业在积极创新中通过创新补偿和先动优势等途径为企业创造收益,部分或全部弥补企业的环境技术创新成本,甚至给企业带来收益^[3,14]。在已有研究中,很多学者证实了环境规制对企业环境技术创新的修正作用,汤长安等^[15]认为,设计合理的环境规制可以促进企业技术创新。这在学界已经达成共识。然而,企业环境技术创新并非环境规制的系统响应,环境政策设计应围绕诱导企业环境技术创新为重要目的^[16],而不仅仅是作为处罚威慑的手段。从这个目的出发,ASHFORD et al.^[17]和HAHN^[18]强调环境规制制定者必须认真考虑规制设计的严格性、灵活性和实施的时机;赵爱武等^[19]运用计算实验方法,模拟了不同的环境税征收时机和征税强度对企业环境技术创新行为及其绩效的影响。

具体到政策组合的设置,宋马林等^[20]研究发现,中国在环境创新政策的制定中需要重视地域差异性,以促进中国环境效率的整体提升。尤其在新型产业发展领域,政府需要对处于不同阶段的产业实施差异化的政策,以提高政策引导和扶持的效力^[21]。李树等^[22]认为,只有将环境政策和科技创新政策相互结合,才能有效促进环境技术的研发和应用;JANICKE^[16]认为,政策设计尤其应该兼顾创新过程支持和扩散激励,从政策补贴的角度给予企业更多的环境技术创新激励和扶持,帮助企业应对环境技术创新的不确定性风险;何小钢^[23]认为,研发政

策与环境规制结合使用能够形成互补耦合,从而有效激发绿色创新。

20世纪初,政策组合概念被引入创新领域。环境经济学家普遍认同多种政策同时实施是实现环境技术创新的最佳策略^[24]。当采用单一的命令控制型环境规制时,市场激励及贷款或奖励机制的缺失阻碍了企业将绿色创新理念付诸于环境技术创新行动^[25]。通常情况下,政策的相互作用可以加强单个政策的影响或弥补单个政策可能产生的负面作用^[26]。因此,在实施严格环境规制的同时,政府应把环境创新作为企业获得财政补贴的重要依据^[27]。尤其为了应对企业环境技术创新中的不确定性,将绿色保险补贴与环境规制结合,可以更好地帮助企业应对环境技术创新产生的不确定风险^[28]。具体到政策组合的作用机理,YU et al.^[29]进一步探讨了环境规制、利益相关者压力、市场营销能力与企业环境技术创新战略之间的关系。为降低严厉的环境规制下企业环境技术创新导致的利润下滑,DAI et al.^[30]研究政策组合对企业过程创新和产品创新行为的影响,揭示了政策引导消费者绿色消费理念的重要性;GUO et al.^[31]建议借助于命令型与市场型环境规制对企业环境技术创新的交互影响,通过政策组合激励企业进行环境技术创新,实现区域绿色增长。

尽管目前国内外学者从理论和实践层面对环境政策和企业环境技术创新做了大量研究,为保护环境提供了宝贵的建议和思路,但目前研究多基于实证方法,缺乏各种政策组合情景的完备样本;或采用可计算的一般均衡(computable general equilibrium, CGE)模型政策模拟工具,难以兼顾企业微观层面的风险偏好等异质特征和主客观条件对其创新行为的影响,因此难以反映不同政策组合情景对环境技术创新过程影响的微观机理和政策相互作用的动态性^[32]。在不同的环境政策情景下,企业如何选择环境技术创新、环境技术创新如何影响企业绩效、企业如何应对环境政策的变化、如何打开企业的“黑箱”探讨其环境技术创新的内在机理等问题仍没有得到充分论证。从微观视角出发,研究企业在不同环境政策下的技术创新路线,深入分析不同环境规制下企业的生存发展状况,可以探索不同环境政策情景下企业环境技术创新行为的演化规律,并从宏观层面归纳环境政策与企业环境技术创新的关系。本研究在调查研究取得实证数据的基础上,构建企业环境技术创新动态仿真模型,利用社会科学计算实验方法^[33],对企业环境技术创新与其内生要素和外部驱动力之间的相互作用机理进行动态仿真,明确企业实施环境技术创新的动机及其影响机制,为环境政策制定者提供微观理论支持。

2 模型构建

2.1 情景描述

本模型以现实世界中的某类制造企业为原型,以生产过程中的挥发性有机化合物(volatile organic

compounds, VOC)排放量代表企业的污染排放水平。假设系统初始阶段企业采用传统技术,生产工艺较为成熟,生产成本较低,产品质量较好,但排放水平较高。而与之对应的环境创新技术可以有效降低污染排放水平,但新技术转换需要一定资金投入,且初期生产成本较高,产品质量较低。模型中主要包含企业和消费者两大类主体,消费者根据自身偏好选择不同企业的产品,而企业间自由竞争,并根据各自的决策规则选择技术创新路线。

由于实证方法缺乏不同环境政策的对样品,本研究运用社会科学计算实验方法,参考ARFAOUI et al.^[34]和关洪军等^[35]的多智能体模型的研究思路,根据现实原型系统搭建计算实验模型,对不同的政策情景进行模拟。本研究所建模型旨在作为研究工具模拟不同政策情景下,在行业竞争和市场选择的共同作用下,企业环境技术创新的动态过程,以此寻求推动企业环境技术创新的最优政策组合。

2.2 基本假设

根据2.1中的情景描述,系统基本假设如下。

(1) T_1 为采用传统技术, T_2 为采用环境创新技术,采用两种技术生产的产品价格不同、质量不同、VOC排放不同,且受技术条件限制,不同技术的最低生产成本、最高产品质量和最低VOC排放有差异。

(2)系统中有 m 家企业,分别以企业主体编号 i ($i = 1, 2, \dots, m$)表示,企业初始阶段规模相同,均采用 T_1 技术,但由于 T_2 技术作为一种新技术, i 企业对 T_2 有一定的关注程度,且逐渐将一定比例的R&D投入用于学习和研究 T_2 。当满足一定条件时,企业开始采用 T_2 技术,但 T_1 技术可能并存,直到达到一定条件时,企业才会放弃 T_1 技术。企业对 T_2 技术的采用阈值与 T_1 技术的淘汰阈值不同。为保证系统中企业总数的基本一致,假设当企业亏损达到一定程度时退出市场,同时有新的加入者进入市场。

(3)系统中有 n 个消费者,分别以消费者主体编号 j ($j = 1, 2, \dots, n$)表示。假设产品为易耗必需品,消费者会定期进行购买。由于消费者不可能知道具体的工艺细节,根据ZEPPINI et al.^[36]的模型,创新产品扩散中消费者主要考虑产品价格、性能、消费习惯和产品口碑,并具有一定的社会模仿能力。因此,假定消费者根据产品价格和质量选择不同企业、不同技术的产品,而不同消费者对产品价格和质量的偏好不同,且购买决策受其他消费者影响。同时,考虑到消费者消费习惯的影响,具有一定的路径依赖属性,目前企业产品的选择价格和质量在可承受范围内,消费者仍然选择原来的企业。消费者对产品价格和质量有不同的接受程度。

(4)产品为不变报酬型,即生产效率不会随生产规模的扩大而提高,只有对生产效率进行技术改造,才会降低生产成本。因此假定产品定价基于生产成本,即 $p = c(1 + \mu)$, p 为产品价格, c 为生产成本, μ 为企业的满意利润水平(考虑企业为有限理性),假设所有企业都满意同一水平的利润,就可以通过企业的

生产效率水平反映产品的价格水平。

2.3 主体行为规则

2.3.1 消费主体行为规则

消费者选择产品一般考虑产品的价格和质量两个因素,不同的消费者往往有不同的偏好,且受其他消费者选择的影响。参考关洪军等^[35]构建的消费者绿色购买动机函数,消费者产品选择效应函数表示为

$$U_{i,k,t}^j = \{ (A - P_{i,k,t}) [Ms_{i,k,t-1} + u(0,0.1)]^{inf} \} p_j^p \cdot \{ (X_{i,k,t} - H) [Ms_{i,k,t-1} + u(0,0.1)]^{inf} \} p_j^x \quad (1)$$

其中, $U_{i,k,t}^j$ 为 j 消费者对 i 企业生产的 k 产品在 t 周期的效应计算值; k 为产品类型, 1 为传统技术产品, 2 为环境创新技术产品; t 为模拟周期, 假定系统总的演化周期数为 $S, t = 1, 2, \dots, S$; A 为消费者能够承受的产品最高价格; $P_{i,k,t}$ 为 i 企业 k 产品在 t 周期的价格; $Ms_{i,k,t-1}$ 为 i 企业 k 产品在 $(t-1)$ 周期的市场份额; $X_{i,k,t}$ 为 i 企业 k 产品在 t 周期的质量水平; H 为消费者能接受的产品最低质量要求; $u(0,0.1)$ 为 $0 \sim 0.1$ 之间的随机数, 反映市场中其他不确定因素的影响, 也是为了避免市场份额为 0 时效应为 0 的情况; inf 为从众效应, 反映消费者的模仿行为; p_j^p 为 j 消费者对产品价格的偏好, p_j^x 为 j 消费者对产品质量的偏好, $p_j^p + p_j^x = 1$ 。

首次选择产品时, 消费者根据每种产品的效应函数确定其选择概率, 随机选择产品。后续周期, 消费者依据路径依赖原则, 先观察当期所有企业产品的最低价格和最高质量, 当消费者上一周期选择产品的性价比在本周期仍在消费者可容忍 (即小于或等于 j 消费者的容忍度 Tol_j) 范围内时, 消费者选择与上一周期相同的企业产品; 否则, 重新根据各产品效应函数确定产品选择概率, 随机选择产品。

2.3.2 企业主体行为规则

根据假设, 初始阶段系统中所有企业规模和资金状况相同, 每个模拟周期, 企业从生产销售活动中获取利润, 并为提高产品竞争力开展技术创新。本模型参考刘小峰等^[37]构建的企业模型, 不考虑贷款等其他途径获取资金的情况, 则企业的各周期可支配资金总额为

$$B_{i,t} = B_{i,t-1} + \Pi_{i,t-1} - RD_{i,t-1} \quad (2)$$

其中, $B_{i,t}$ 为 i 企业在 t 周期的可支配资金总额, $\Pi_{i,t-1}$ 为 i 企业在 $(t-1)$ 周期的利润所得, $RD_{i,t-1}$ 为 i 企业在 $(t-1)$ 周期的 R&D 支出。

对于新的 T_2 技术采用者, 需要支付额外的技术转换成本, 如设备投入、人员培训费用等, 因此有

$$B_{i,t} = B_{i,t-1} + \Pi_{i,t-1} - RD_{i,t-1} - SC_{i,t} \quad (3)$$

其中, $SC_{i,t}$ 为 i 企业在 t 周期初次采用 T_2 技术的转换成本。

企业主体利润的计算公式为

$$\Pi_{i,t} = \sum_{k=1}^2 (\mu \cdot C_{i,k,t} \cdot Q_{i,k,t}) - FC \quad (4)$$

其中, μ 为企业的满意利润水平; $C_{i,k,t}$ 为 i 企业 k 产品在 t 周期的生产成本, 根据 2.2 中基本假设 (4), $P_{i,k,t} = (1 + \mu) \cdot C_{i,k,t}$; $Q_{i,k,t}$ 为 i 企业 k 产品在 t 周期的产品销量, FC 为固定成本。

(1) 企业进入/退出规则

企业可支配资金小于一定水平时, 宣告破产并从市场退出, 同时新的企业进入市场。新进入的企业采用的技术路线是模仿现有企业的系统, 模仿目标的概率是基于每个企业的市场份额确定的。新企业模仿目标企业的技术路线, 其学习吸收能力为介于 $[0.8, 1.2]$ 的随机数^[36], 产品价格、质量和 VOC 排放等各项指标在被模仿企业产品指标基础上乘或除 (正指标乘, 逆指标除) 以随机数, 因此可以低于或超越被模仿企业。新企业的初始可支配资金和固定成本与其他企业初始时类似, 知识存量和 T_2 技术的转换成本取行业平均值。

(2) 企业技术路线选择规则

每周期各企业计算其对 T_2 技术成熟度的感知, 即

$$ADi_{i,t}^{T_2} = K_{i,t-1} \cdot Ms_{i,t-1}^{T_2} \quad (5)$$

其中, $ADi_{i,t}^{T_2}$ 为 i 企业在 t 周期对 T_2 技术成熟度的感知值, $K_{i,t-1}$ 为 i 企业在 $(t-1)$ 周期通过技术研发等手段获取的 T_2 技术知识累积, $Ms_{i,t-1}^{T_2}$ 为在 $(t-1)$ 周期采用 T_2 技术生产产品的市场总份额。可见, 采用 T_2 技术的可能性依赖于 T_2 技术的知识累积和 T_2 技术的产品的市场扩散。当企业认为 T_2 技术成熟度大于一定程度 (企业属性之一: T_2 技术采用阈值) 时, 企业检查是否有足够可支配资金支持新技术转换, 当 $B_{i,t} \geq SC_{i,t}$ 时, 企业正式采用 T_2 技术进行生产。

采用 T_2 技术并不意味着一定放弃 T_1 技术, 根据假设, 在同一企业两者可以并存。是否选择放弃 T_1 技术, 取决于 T_2 技术的产品收入在企业总收入中所占的比重, 即

$$Sha_{i,t}^{T_2} = \frac{P_{i,2,t-1} \cdot Q_{i,2,t}}{\sum_{k=1}^2 (P_{i,k,t-1} \cdot Q_{i,k,t})} \quad (6)$$

其中, $Sha_{i,t}^{T_2}$ 为 i 企业在 t 周期采用 T_2 技术生产产品的收入占企业总收入的比重, $P_{i,2,t-1}$ 为 i 企业采用 T_2 技术生产产品在 $(t-1)$ 周期的价格, $Q_{i,2,t}$ 为 i 企业采用 T_2 技术生产产品在 t 周期的产品销量。当 T_2 技术所占比重达到企业放弃 T_1 技术的阈值时, 企业放弃 T_1 技术, 仅采用 T_2 技术进行生产。该阈值也反映了企业对 T_2 技术的风险态度, 阈值水平越高, 企业越保守, 放弃 T_1 技术的可能性越小; 反之, 阈值水平越低, 企业越敢于冒险, 越易于采用 T_2 技术。

(3) 企业 R&D 活动规则

每周期各企业通过 R&D 活动提高产品各项性能, R&D 投资额为

$$RD_{i,t} = \delta \cdot B_{i,t} \quad (7)$$

其中, δ 为 R&D 投资比例, 前提是 $B_{i,t} > 0$ 。

企业的 R&D 投资按比例分别用于 T_1 和 T_2 技术研发, 即

$$RD_{i,t}^{T_1} = \delta_1 \cdot RD_{i,t} \quad (8)$$

$$RD_{i,t}^{T_2} = (1 - \delta_1) \cdot RD_{i,t} \quad (9)$$

其中, δ_1 为用于 T_1 技术研发的投资占 R&D 投资额的比例, $\delta_1 \in [0, 1]$ 。对于已经完全转换为 T_2 技术的企业, 旧的 T_1 技术已完全淘汰, 因此 $\delta_1 = 0$; 对于仅采用 T_1 技术进行生产的企业, $\delta_1 = 1$ 。 $(1 - \delta_1)$ 为企业对 T_2 技术研发的投资占 R&D 投资额的比例, 此时对于 T_2 技术的研发并不涉及正式生产, 是对 T_2 技术的前期研发和学习, 因此 $RD_{i,t}^{T_2} = RDw_{i,t}$, $RDw_{i,t}$ 为 i 企业在 t 周期进行前期研发和学习的投资占 R&D 投资额的比例。由于对 T_2 技术的研发和学习过程取得的实质性进展具有不确定性, 且与资金投入有关, 因此知识累积增加需要满足下述条件, 即

$$1 - e^{-\alpha_w \cdot RDw_{i,t}} \geq u(0, 1) \quad (10)$$

其中, α_w 为知识累积的速度控制参数。 u 均匀随机分布在 $0 \sim 1$ 之间, 反映了创新活动的不确定性。如果 (10) 式成立, 表明研发活动获得阶段性成果, T_2 技术知识累积值增加, 且转换为 T_2 技术的成本降低, 即

$$K_{i,t} = K_{i,t-1} + \alpha_k \cdot u(0, 1) \cdot (K_{\max} - K_{i,t-1}) \quad (11)$$

$$SC_{i,t} = SC_{i,t-1} - \alpha_{SC} \cdot u(0, 1) \cdot (SC_{i,t-1} - SC_{\min}) \quad (12)$$

其中, α_k 为知识累积值增加的速度控制参数, α_{SC} 为转换成本降低的速度控制参数, K_{\max} 为知识累积的最大值, SC_{\min} 为初次采纳 T_2 技术的转换成本的最小值。

生产活动中的技术创新过程与 T_2 技术前期研发和学习过程类似, 而技术创新能否成功取决于是否满足如下条件, 即

$$1 - e^{-\alpha_1 \cdot RD_{i,k,t}} \geq u(0, 1) \quad (13)$$

其中, α_1 为技术创新速度。若技术创新成功, 则更新产品各项属性, 即

$$X_{i,k,t} = X_{i,k,t-1} + \beta_1 \cdot u(0, 1) \cdot (X_{\max}^k - X_{i,k,t-1}^k) \quad (14)$$

$$C_{i,k,t} = C_{i,k,t-1} + \beta_2 \cdot u(0, 1) \cdot (C_{i,k,t-1}^k - C_{\min}^k) \quad (15)$$

$$Voc_{i,k,t} = Voc_{i,k,t-1} + \beta_3 \cdot u(0, 1) \cdot (Voc_{i,k,t-1}^k - Voc_{\min}^k) \quad (16)$$

其中, X_{\max}^k 为生产 k 产品采用相应技术能够达到的质量最大值, $X_{i,k,t-1}^k$ 为 i 企业生产 k 产品采用相应技术在 $(t-1)$ 周期的质量水平, $C_{i,k,t-1}^k$ 为 i 企业生产 k 产品采用相应技术在 $(t-1)$ 周期的生产成本, C_{\min}^k 为生产 k 产品采用相应技术能够达到的单位成本最小值, $Voc_{i,k,t}$ 为 i 企业生产 k 产品在 t 周期的 VOC 排放量, $Voc_{i,k,t-1}^k$ 为 i 企业生产 k 产品采用相应技术在 $(t-1)$ 周期的 VOC 排放量, Voc_{\min}^k 为生产 k 产品采用相应技术能够达到的 VOC 单位排放最小值, β_1 为产品质量的改善效率, β_2 为生产成本的改善效率, β_3 为 VOC 排

放的改善效率。

企业主体各周期的工作流程见图1。

2.4 参数设置

系统参数设置要考虑现实情景中企业环境技术创新的实际情况, 对难以量化的情景参数 (如消费者对产品的价格和质量的偏好), 通过反复模拟, 观察中间结果和最终结果, 使结果与现实情况相吻合。在确定基本模型参数后, 引入策略参数观察策略工具对仿真结果的影响。系统中的主要变量及其初始赋值规则见表1。

表1 主要变量及初始赋值规则

Table 1 Main Parameters and Initial Value Rules

变量或参数	含义	赋值	赋值规则
m	企业数	10	固定值
n	消费者数	200	固定值
A	消费者接受的最高价格	6	模拟训练
H	消费者接受的最低质量	20	模拟训练
p^p	消费者对产品价格偏好	[0.1, 0.9]	消费者随机
inf	消费者的从众效应	0.05	模拟训练
Tol	消费者的容忍度	[0.8, 1.2]	模拟训练
μ	满意利润水平	0.8	固定值
Ad_{\min}	T_2 技术接受阈值	[0, 2]	企业随机
Ab_{\min}	T_1 技术放弃阈值	[0.5, 1]	企业随机
δ	R&D 投资比例	0.2	固定值
δ_1	用于 T_1 技术研发的投资占 R&D 投资额的比例	[0, 1]	企业随机
α_w	知识累积的速度	0.2	模拟训练
α_1	技术改造速度	0.25	模拟训练
K_{\max}	知识累积的最大值	1	固定值
β_1	产品质量的改善效率	0.05	模拟训练
β_2	生产成本的改善效率	0.08	模拟训练
β_3	VOC 排放的改善效率	0.05	模拟训练

3 模拟实验和结果分析

本模型以无政策工具干预的基本情景为基础, 主要模拟3种政策工具对企业环境技术创新的影响, 即征收排污费、环境创新技术采用补贴和环境创新产品价格补贴。为对比各政策工具的作用, 设计如下政策情景进行对比实验。

O 为无任何政策工具干预;

F 为对单位产品 VOC 排放大于一定水平的产品

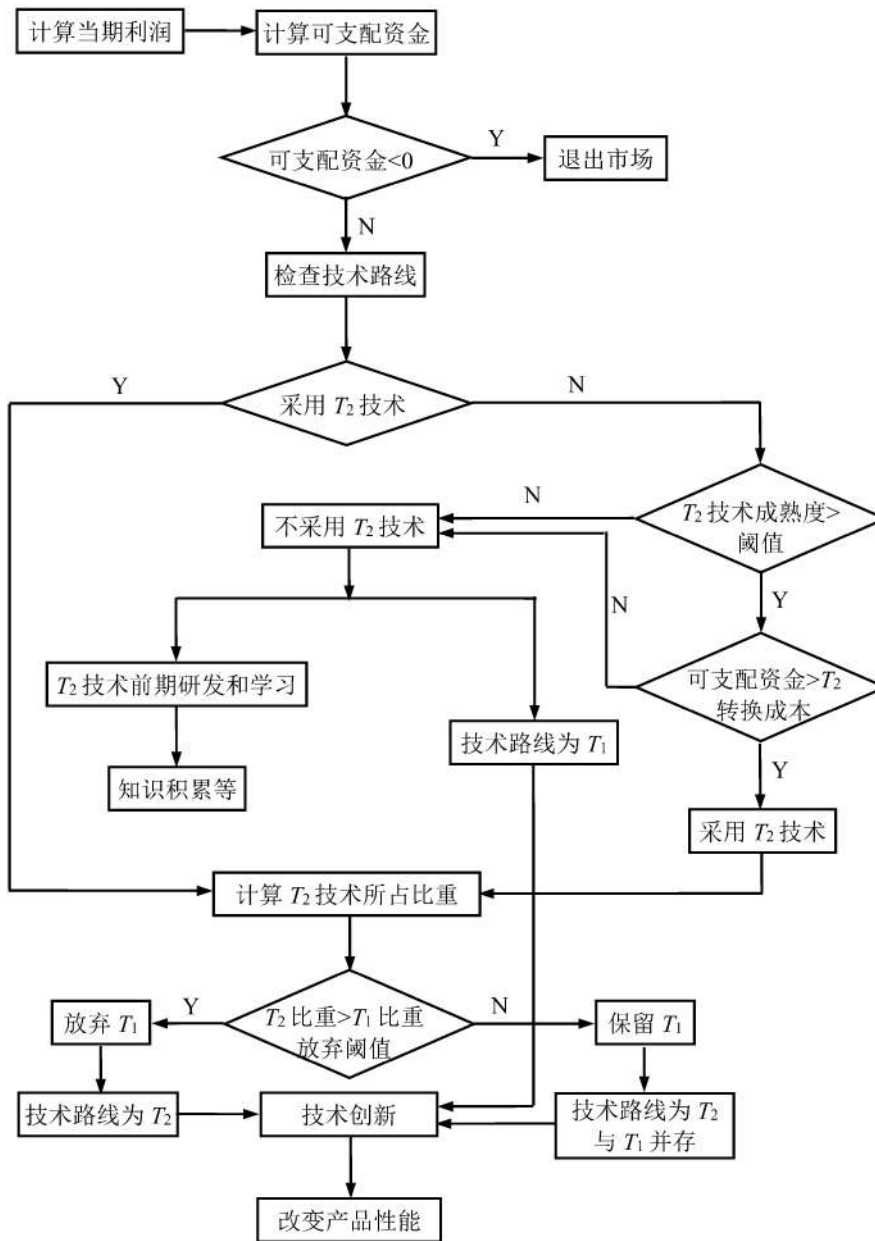


图1 企业主体工作流程图
Figure 1 Workflow Diagram for Enterprise Agent

征收排污费的政策情景；

F_1 为系统开始阶段开始征收排污费的政策情景；

F_{150} 为系统中间阶段开始征收排污费的政策情景；

I 为补贴企业采用环境创新技术时发生的转换成本的政策情景,如补贴新设备投入的政策等；

M 为对市场中的环境创新技术产品实行价格补贴的政策情景；

$IF_1、MF_1、IM、IMF_1、IF_{150}、MF_{150}、IMF_{150}$ 分别为以上政策工具情景的组合。

3.1 征收排污费情景下企业环境技术创新过程模拟

征收排污费情景下,当单位产品生产过程中的VOC排放超过一定标准 E_0 时,将额外征收排污费。因此,当期利润公式(4)式调整为

$$\Pi_{i,t} = (\mu \cdot C_{i,t} \cdot Q_{i,t}) - FC - \max[(Voc_{i,t} - E_0), 0] \cdot Q_{i,t} \cdot f \quad (17)$$

其中, f 为单位产品征收的排污费; E_0 为征收标准,取上期所有企业生产过程中能达到的最低VOC排放。

当 f 分别为0、0.1、0.3、0.5、0.8和1.0时,排污费开始征收的时间点分别为系统开始阶段(F_1)和系统运行至中间阶段(F_{150}),其他参数设置与基本情景

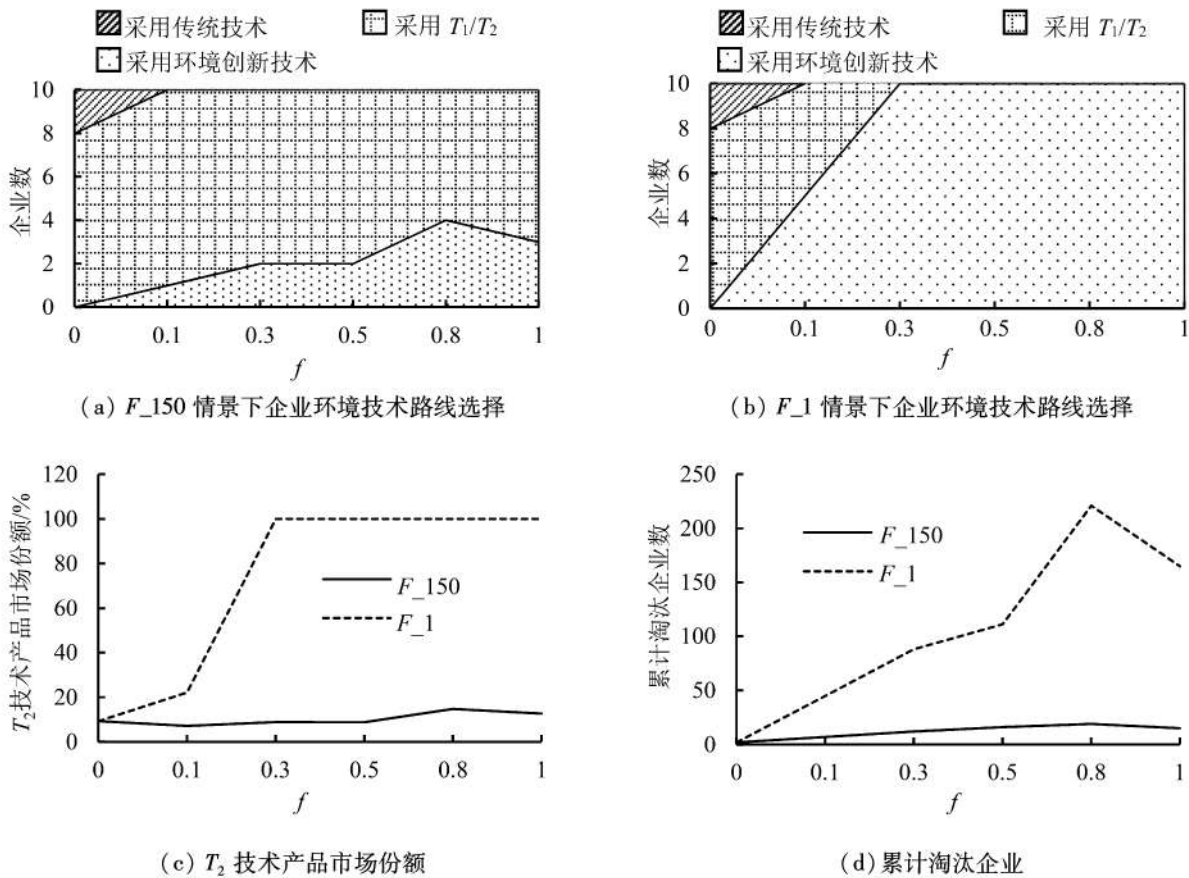


图2 不同排污费情景下企业环境技术创新过程

Figure 2 Enterprise Environmental Technology Innovation Process under Different Drainage Fee Scenarios

相同,系统运行300周期,模拟结果见图2。

由图2(a)可知,在 F_{150} 情景下,完全采用 T_2 技术的企业数随征收力度的增大呈倒U形变化,顶点出现在 $f=0.8$ 时,共有4家企业完全采用 T_2 技术,表明环境规制对企业环境技术创新的影响是非线性的,这一结论与李勃斯等^[38]通过面板数据分析所得结论一致。由图2(b)可知,在 F_1 情景下,当 $f \geq 0.3$ 时,所有企业均采用环境创新技术。同时,由图2(c)可知, F_1 情景下,当征收力度大于0.3时, T_2 产品可以完全占领市场,似乎加大排污费征收力度即可完成环境创新技术的推广。但从图2(d)可知,随着排污费征收力度的加大, F_1 情景下,更多企业被淘汰,以每个模拟周期对应一个月时间计算,则征收力度为0.1时年淘汰比例已达20%;而在 T_2 技术产品市场占有率达到100%的0.3征收力度下,企业的年淘汰比例高达40%,随着征收力度的加大,企业淘汰率还在继续增加。因此,单纯通过加大排污费征收力度、强制企业采用环境创新技术的做法会导致企业无法经营。而 F_{150} 情景下,随着征收力度的加大, T_2 技术产品市场份额波动幅度不大,最高点出现在征收力度为0.8时,仅约为20%。可见,征收排污费虽然一定程度上有利于促使企业采用环境创新技术,但单纯依靠征收排污费政策难以取得理想效果。

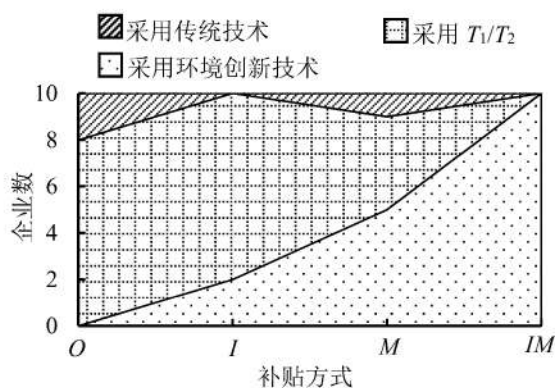
3.2 环境创新补贴政策下企业环境技术创新过程模拟

环境创新技术采用补贴情景(I)下,由于政府补贴环境创新技术采用所需的转换成本,因此(3)式退化为

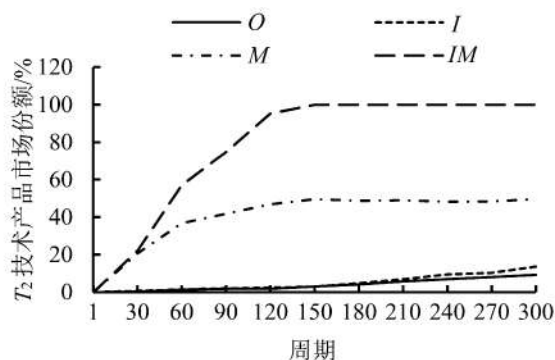
$$B_{i,t} = B_{i,t-1} + \Pi_{i,t-1} - RD_{i,t-1} \quad (18)$$

而环境创新技术产品市场价格补贴情景(M)下,政府对环境创新技术产品实行价格补贴,假设补贴后产品价格与传统技术产品市场平均价一致。模型中其他参数设置与基本情景相同,系统运行300周期,模拟结果见图3。

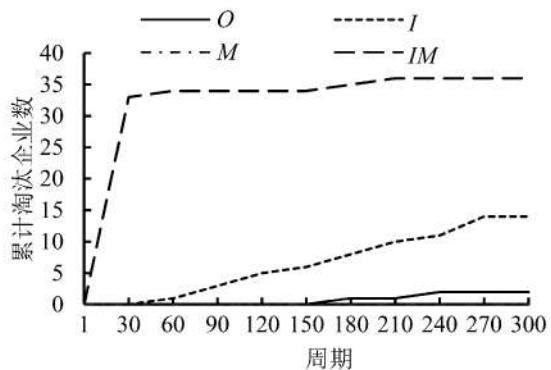
由图3(a)可知,补贴政策情景下,完全采用环境创新技术的企业数 $IM > M > I > O$,补贴政策可以不同程度地促使企业采用环境创新技术;由图3(b)可知, IM 情景下,120周期后 T_2 技术产品完全占领市场;但由图3(c)可知, IM 情景下企业淘汰率高,尤其前30周期,大量企业退出市场。这是由于在环境创新技术采用补贴和价格补贴的双重作用下,企业环境创新技术采用门槛降低,较多企业选择环境创新技术进行生产。然而,尽管政策补贴缩小了 T_2 技术产品与 T_1 技术产品的价格差距,但 T_2 技术产品质量差导致消费者选择率低,企业淘汰率高。在仅补贴价格的 M 情景下,几乎无企业淘汰,而300周期时 T_2 技术产品



(a) 企业技术路线选择



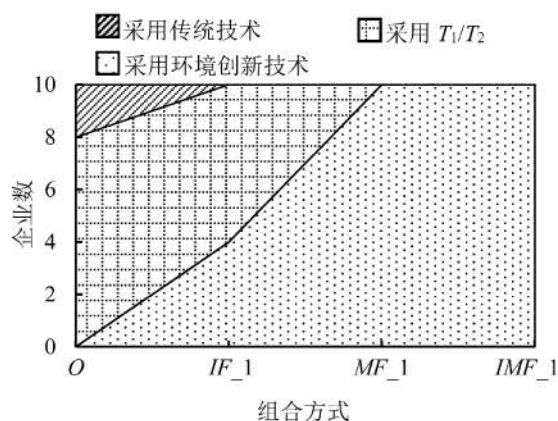
(b) T_2 技术产品市场份额



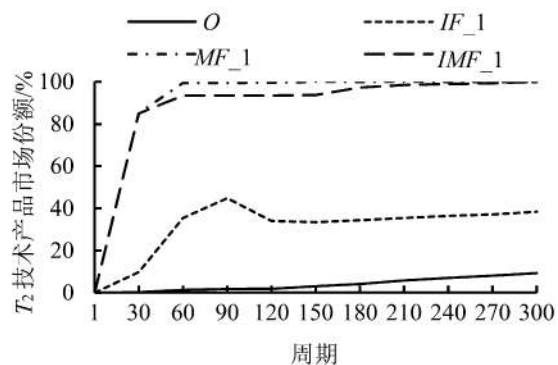
(c) 累计淘汰企业

图3 环境创新补贴情景下企业环境技术创新过程
Figure 3 Enterprise Environmental Technology Innovation Process under Environmental Innovation Subsidy Scenarios

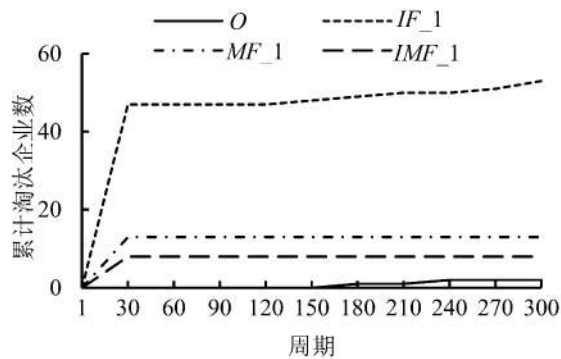
市场占有率约40%,由图3(a)可知,完全采用 T_2 技术企业约占总企业数的50%,40%企业采用组合技术路线,另有10%的企业仍然只采用 T_1 技术。可见,环境创新技术的采用应顺应市场机制,当产品质量不成熟时,仅通过补贴企业转换成本的方式盲目促使企业完成技术转换,不利于环境创新技术的长期扩散。



(a) 企业技术路线选择



(b) T_2 技术产品市场份额



(c) 累计淘汰企业

图4 F_1 与补贴政策组合情景下企业环境技术创新过程
Figure 4 Enterprise Environmental Technology Innovation Process under the Combination of F_1 and Subsidy Policy Scenarios

3.3 组合政策工具下企业环境技术创新过程模拟

3.3.1 F_1 与补贴政策组合

分别将征收排污费政策 F_1 与环境创新技术采用补贴政策 I 和环境创新产品价格补贴政策 M 结合,300周期的模拟结果见图4。

MF₁和IMF₁情景下,由图4(a)可知,300周期时企业全部采用环境创新技术。图4(b)表明,T₂技术产品市场占有率几乎均达到100%;不同的是,MF₁情景下60周期时T₂技术产品占有率即达到100%,而IMF₁情景下直到180周期才达到100%。由图4(c)可知,MF₁情景下的企业淘汰率略大于IMF₁,这是由于在价格补贴和征收排污费的双重作用下,企业积极采用环境创新技术,而与IMF₁相比,创新技术采用企业需要承担高额的转换成本,导致日常技术研发投入降低,产品竞争力下降,加速了竞争力较弱企业被淘汰。而由于被淘汰的企业通常是资金状况较差的企业,新加入企业模仿主流企业技术组合,因此更快到达T₂技术完全扩散的状态,这也解释了图4(b)中MF₁比IMF₁更早达到T₂技术产品占有率100%的情形。

而与图3中无排污费征收政策的IM情景相比,加入排污费征收的IMF₁情景下T₂技术产品同样达到100%市场占有率,且IMF₁情景下企业淘汰率大幅下降。然而,此情景发生的前提是环境规制的严格执行,否则就会出现IM情景,其结果是大量采纳环境创新技术的企业被淘汰,而采取传统技术的小企业通过偷漏税罚等手段,反而能够长期存在。

3.3.2 F₁₅₀与补贴政策组合

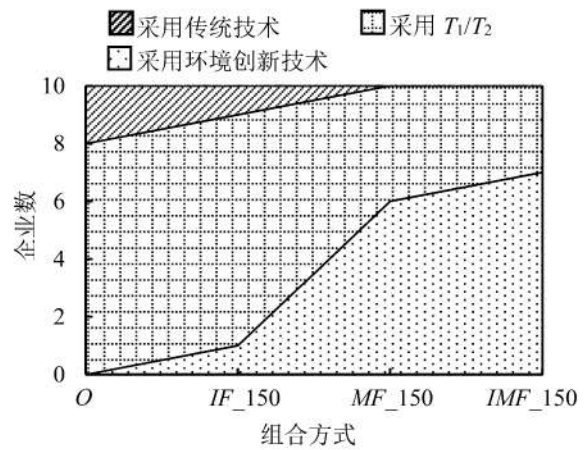
分别将征收排污费政策F₁₅₀与环境创新技术采用补贴政策I和环境创新产品价格补贴政策M结合,300周期的模拟结果见图5。

IF₁₅₀情景下,由图5(a)可知,300周期时企业环境创新技术采用企业数均有不同程度增加;但由图5(b)可知,T₂技术产品市场份额几乎与无政策工具干预的O情景一致,对推动企业环境创新技术扩散效果不明显;而由图5(c)可知,淘汰企业数显著增加。MF₁₅₀和IMF₁₅₀情景下,均可有效推动企业采用环境创新技术,T₂技术产品在90周期后市场分额都达到60%左右,且没有企业被淘汰。但两种情景相比,IMF₁₅₀需要更多补贴投入,因此,就效率而言,在温和的征收排污费手段下,MF₁₅₀是保证企业稳定经营前提下促使更多企业采用环境创新技术的最优策略。

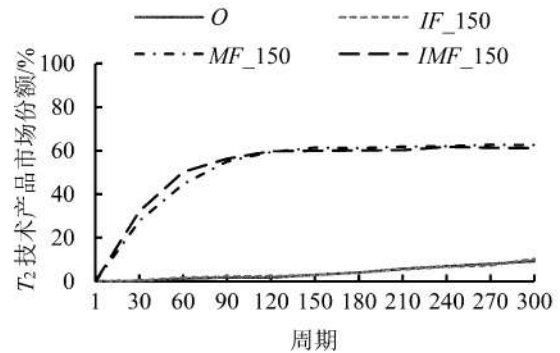
通过以上分析可知,当征收排污费政策与补贴政策相结合时,良好的组合可以收到满意的效果。其中严厉的征收排污费模式F₁情景下,若能保证规制的严格执行,则可通过与创新技术转换补贴和价格补贴政策的组合,淘汰少量技术落后企业,达到T₂技术的完全扩散;在温和的F₁₅₀情景下,可通过与价格补贴手段的组合,在保证企业正常经营的前提下,推动企业逐步采用环境创新技术,使T₂技术产品占市场更多份额。

3.4 环境创新政策工具实例

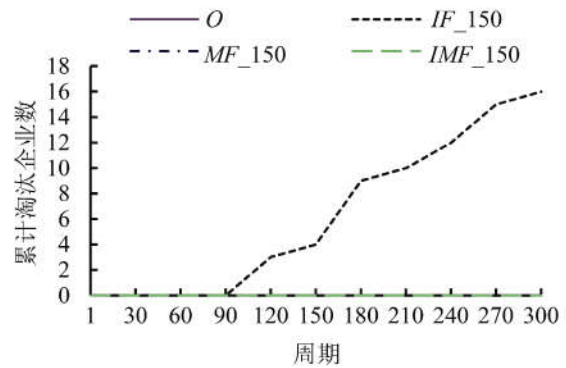
制药行业生产过程中需要使用大量溶剂,以充分发生反应和分离反应产物,传统生产工艺中使用的有机溶剂绝大多数都是易挥发、有毒和有害的,这种挥发性有机溶剂是造成大气污染的主要废弃物之



(a) 企业技术路线选择



(b) T₂技术产品市场份额



(c) 累计淘汰企业

图5 F₁₅₀与补贴政策组合情景下企业环境技术创新过程

Figure 5 Enterprise Environmental Technology Innovation Process under the Combination of F₁₅₀ and Subsidy Policy Scenarios

一。随着人们对环境问题的关注,能够替代这类有机溶剂的新型绿色溶剂已走出实验室,为从源头上解决企业挥发性有机溶剂排放问题提供了新思路。这种绿色溶剂可以为土壤生物或其他物质降解,半衰期短,很容易衰变成低毒、无毒的物质,也称为环

境友好型溶剂。

2018年10月1日起,长三角部分地区执行更加严格的《化学合成类制药工业大气污染物排放标准》(DB33/2015-2016),替代目前VOC执行的《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996)。以长三角地区制药企业为样本,进行绿色溶剂采用意愿的问卷调查,采取邮寄、传真、深度访谈等调查方式,发放问卷100份,要求一律由企业中高层管理人员填写,回收问卷89份,其中有效问卷78份,有效回收率为78%。对企业采用绿色溶剂的影响因素进行全面调研,既包括企业采用或不采用绿色溶剂的主客观原因,也包括政策因素对企业采用意愿、采用行为及经济和环境绩效的影响等。参考关洪军等^[35]的研究设计问卷,①企业采用绿色溶剂的影响因素包括预期经济收益和利益相关者压力2个维度,预期经济收益的测量题项主要包括“采用绿色溶剂有利于企业提升品牌价值”“采用绿色溶剂有助于提高企业竞争力”“采用绿色溶剂能够帮助企业开拓新市场”;利益相关者压力的测量题项主要包括“来自媒体的压力促使企业采用绿色溶剂”“来自环保组织的压力促使企业采用绿色溶剂”“来自社区居民的压力促使企业采用绿色溶剂”“来自消费者的压力促使企业采用绿色溶剂”“来自竞争者的压力促使企业采用绿色溶剂”“来自股东的压力促使企业采用绿色溶剂”;②不采用绿色溶剂的主要测量题项包括“绿色溶剂应用技术尚不成熟”“企业没有足够的财务资源进行新技术研发”“企业没有足够的人力和财力资源进行新市场开拓”“企业没有足够的技术力量进行新技术研发”“企业不能在需要时获得银行贷款或其他金融机构资助”;③政策因素对企业采用行为和经济绩效影响的测量题项包括“政府环境监测及行政处罚通过增加排污成本促使企业采用环境创新技术”“日益严格的环境规制促使企业采用绿色溶剂”“企业采用绿色溶剂获得的环境创新补贴降低了企业成本”“企业采用绿色溶剂获得的税费优惠能够降低企业生产成本”。

实证结果发现,尽管大多数企业认为绿色溶剂技术前景较好,但由于绿色溶剂实际应用经验不足,使用效率和储存中存在一系列技术问题,只有10%左右技术实力较强的企业愿意在生产中采用绿色溶剂技术。而当政府同时采取绿色溶剂的新产品价格补贴政策时,大部分企业从长远利益考虑,更愿意投资于绿色溶剂技术改造,以降低企业排污成本。

4 结论

本研究运用社会科学计算实验方法,在实证研究的基础上构建企业环境技术创新计算实验模型,基于模型分别模拟排污费及不同补贴方式等政策工具组合情景下企业环境技术创新过程,并分析不同情景下企业减排及经济收益的变化情况。

研究结果表明,由于环境创新产品的市场竞争力决定企业对环境创新技术的采用行为,因此政策

工具的制定应立足于促进环境创新技术的发展,以提高创新产品的市场预期,降低创新技术采用成本。在市场机制与企业竞争的共同作用下,当环境创新产品市场竞争力较弱时,单一的补贴政策对环境创新技术促进效果不明显,应考虑多种政策工具的优化组合。严格的环境税费制度与环境创新产品价格补贴政策相组合,可有效促进企业环境技术创新;但严格的环境税费在激励创新的同时,可能增加企业负担,因此在创新技术更替的过程中会有大量资金薄弱、技术落后的企业被淘汰。而宽松的环境税费制度与补贴环境创新产品市场的政策工具相组合,首先通过环境税费预期提高企业对环境创新技术的预期,提前为技术更替做好准备,从而可以在维持企业正常经营的前提下,逐步促进企业环境技术创新,完成新旧技术更替。

4.1 理论意义

本研究从政策组合视角研究政策之间的相互作用及动态作用机制,拓展了关于环境规制与企业环境技术创新关系的理论研究。已有研究大多仅从环境规制的设计出发探讨波特假说创新补偿效应实现的条件,往往难以解释促进与抑制两种截然不同结论的本质原因。本研究从政策组合视角出发,揭示了环境规制激励企业环境技术创新的本质,给出波特假说实现的政策条件及其实现路径,弥补了环境规制与企业环境技术创新理论研究的不足。本研究从企业逐利的本质出发探索企业环境技术创新的动因及其政策需求,并通过丰富的情景设置深化创新政策激励机制的理论研究。已有研究大多基于实证研究或数理方法探索单项政策对企业环境技术创新的作用,忽视了不同政策之间产生的耦合效应。本研究采用计算实验方法,模拟丰富的政策组合情景下企业环境技术创新的演化路径,研究结论更具普适性,有助于弥补创新政策激励机制研究的不足。

4.2 实践意义

提高征收排污费强度可以促使企业采用环境创新技术,但也给企业增加了经济负担。因此,单纯依靠提高环境规制的方式,在企业资金不够充足的情景下,难以实现波特假说的双赢。采用环境创新技术应考虑技术自身的成熟度和市场培育,仅通过补贴企业转换成本的方式盲目促使企业完成技术转换,对环境创新技术的长期扩散不利。因此,一方面,应建立完善的环境创新技术评估机制,从技术和市场等多维度科学评测环境创新技术水平;另一方面,应做好前期的市场培育工作,以利于环境创新技术的健康发展。当征收排污费政策与补贴政策相结合时,不同税费征收时机、强度和补贴方式的组合可以收到不同的效果,应根据具体情景下的政策目标设计不同的政策组合。高强度的征收排污费模式与创新技术转换补贴和价格补贴政策组合,可以淘汰部分技术落后企业,实现环境创新技术的完全扩散;温和的税费征收模式与价格补贴手段组合,在保证企业正常经营的前提下,可以推动企业逐步采用环

境新技术,并使环境新技术产品占领较多市场份额。

4.3 研究局限和展望

本研究仍存在不足之处,有待未来研究加以解决。本实验假设系统初始阶段企业规模、资金状况相同,没有考虑不同规模企业的情况。在后续研究中,可加入企业规模、创新偏好、风险态度等变量,探索政策组合对不同类型企业环境技术创新的影响。模型没有考虑企业环境新技术转换及研发中贷款等金融政策工具扶持的情况,也没有考虑企业负债经营的情况,未来可以考虑更多的政策组合场景及类型。消费者产品购买决策仅考虑产品价格、质量和从众效应,没有考虑其对产品环境属性的偏好。随着环境问题的日益严峻,更多消费者开始关注产品环境属性,并在产品购买决策中考虑环境技术产品的溢价支出。因此,可在后续研究中完善消费者购买决策行为,探索消费者与政府共同作用下的企业环境技术创新演化规律。

参考文献:

- [1] FANKHAUSER S, BOWEN A, CALEL R, et al. Who will win the green race? In search of environmental competitiveness and innovation. *Global Environmental Change*, 2013, 23(5):902-913.
- [2] ROPER S, TAPINOS E. Taking risks in the face of uncertainty: an exploratory analysis of green innovation. *Technological Forecasting & Social Change*, 2016, 112:357-363.
- [3] PORTER M E. America's strategy. *Scientific American*, 1991, 264(4):1-5.
- [4] FLANGAN K, UYARRA E, LARANJA M. Reconceptualising the "policy mix" for innovation. *Research Policy*, 2011, 40(5):702-713.
- [5] ACEMOGLU D, AGHION P, BURSZTYN L, et al. The environment and directed technical change. *American Economic Review*, 2012, 102(1):131-166.
- [6] 张红凤,周峰,杨慧,等. 环境保护与经济发展双赢的规制绩效实证分析. *经济研究*, 2009, 44(3):14-26, 67. ZHANG Hongfeng, ZHOU Feng, YANG Hui, et al. Regulation performance of the win-win of environmental protection and economic development. *Economic Research Journal*, 2009, 44(3):14-26, 67. (in Chinese)
- [7] KATSOUACOS Y, XEPAPADEAS A. Environmental policy under oligopoly with endogenous market structure. *Scandinavian Journal of Economics*, 1995, 97(3):411-420.
- [8] RENNINGS K. Redefining innovation: eco-innovation research and the contribution from ecological economics. *Ecological Economics*, 2000, 32(2):319-332.
- [9] 梁伟,朱孔来,姜巍. 环境税的区域节能减排效果及经济影响分析. *财经研究*, 2014, 40(1):40-49. LIANG Wei, ZHU Konglai, JIANG Wei. The regional energy conservation and emission reduction effect and economic impact of environmental tax. *Journal of Finance and Economics*, 2014, 40(1):40-49. (in Chinese)
- [10] WU G C. Environmental innovation approaches and business performance: effects of environmental regulations and resource commitment. *Innovation Management Policy & Practice*, 2017, 19(4):407-427.
- [11] 李阳,党兴华,韩先锋,等. 环境规制对技术创新长期影响的异质性效应:基于价值链视角的两阶段分析. *科学学研究*, 2014, 32(6):937-949. LI Yang, DANG Xinghua, HAN Xianfeng, et al. The study on heterogeneity effect of environmental regulation's long-term & short-term influence on technology innovation: two stages analysis based on value chain perspective. *Studies in Science of Science*, 2014, 32(6):937-949. (in Chinese)
- [12] 李晓冬,王龙伟. 市场导向、政府导向对中国企业创新驱动的比较研究. *管理科学*, 2015, 28(6):1-11. LI Xiaodong, WANG Longwei. The comparative study of promoting effectiveness of market orientation and government orientation on innovation. *Journal of Management Science*, 2015, 28(6):1-11. (in Chinese)
- [13] 赵黎明,殷建立. 碳交易和碳税情景下碳减排二层规划决策模型研究. *管理科学*, 2016, 29(1):137-146. ZHAO Liming, YIN Jianli. Bi-level programming model of carbon emission reduction decision-making under the coexistence of carbon trading and carbon tax. *Journal of Management Science*, 2016, 29(1):137-146. (in Chinese)
- [14] PORTER M E, LINDE C V D. Green and competitive: ending the stalemate. *Harvard Business Review*, 1995, 73(5):120-134.
- [15] 汤长安,黄平. 环境规制下企业环保技术联盟创新. *系统工程*, 2013, 31(6):115-119. TANG Changan, HUANG Ping. The environmental production innovation behavior of the enterprise technical alliance under the constraint of optimal environmental tax. *Systems Engineering*, 2013, 31(6):115-119. (in Chinese)
- [16] JANICKE M. Dynamic governance of clean-energy markets: how technical innovation could accelerate climate policies. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 22(1):50-59.
- [17] ASHFORD N A, AYERS C, STONE R F. Using regulation to change the market for innovation. *Harvard Environmental Law Review*, 1985, 9(2):419-466.
- [18] HAHN R W. Economic prescriptions for environmental problems: how the patient followed the doctor's orders. *Journal of Economic Perspectives*, 1989, 3(2):95-114.
- [19] 赵爱武,杜建国,关洪军. 环境税情景下企业环境技术创新模拟. *管理科学*, 2016, 29(1):40-52. ZHAO Aiwu, DU Jianguo, GUAN Hongjun. Simulation of enterprise environmental technology innovation given the context of environmental tax. *Journal of Management Science*, 2016, 29(1):40-52. (in Chinese)
- [20] 宋马林,王舒鸿. 环境规制、技术进步与经济增长. *经济研究*, 2013, 48(3):122-134. SONG Malin, WANG Shuhong. Analysis of environmental regulation, technological progression and economic growth from the perspective of statistical tests. *Economic Research Journal*, 2013, 48(3):122-134. (in Chinese)
- [21] 周亚虹,蒲余路,陈诗一,等. 政府扶持与新型产业发展:以新能源为例. *经济研究*, 2015, 50(6):147-161. ZHOU Yahong, PU Yulu, CHEN Shiyi, et al. Government support and development of emerging industries: a new energy

- industry survey. *Economic Research Journal*, 2015, 50(6): 147–161. (in Chinese)
- [22] 李树, 陈刚. 环境管制与生产率增长: 以 APPCL2000 的修订为例. *经济研究*, 2013, 48(1): 17–31.
LI Shu, CHEN Gang. Environmental regulation and the growth of productivity in China: evidence from the revision of Air Pollution Prevention and Control Law in 2000. *Economic Research Journal*, 2013, 48(1): 17–31. (in Chinese)
- [23] 何小钢. 绿色技术创新的最优规制结构研究: 基于研发支持与环境规制的双重互动效应. *经济管理*, 2014, 36(11): 144–153.
HE Xiaogang. Research on optimal regulation structure of green technology innovation: based on the dual interaction effect of R&D support and environmental regulation. *Economic Management*, 2014, 36(11): 144–153. (in Chinese)
- [24] 贾军, 张伟. 绿色技术创新中路径依赖及环境规制影响分析. *科学学与科学技术管理*, 2014, 35(5): 44–52.
JIA Jun, ZHANG Wei. The path dependency of green technology innovation and environmental regulation analysis. *Science of Science and Management of S. & T.*, 2014, 35(5): 44–52. (in Chinese)
- [25] FERNANDO Y, WAH W X. The impact of eco-innovation drivers on environmental performance: empirical results from the green technology sector in Malaysia. *Sustainable Production and Consumption*, 2017, 12: 27–43.
- [26] GUERZONI M, RAITERI E. Demand-side vs. supply-side technology policies: hidden treatment and new empirical evidence on the policy mix. *Research Policy*, 2015, 44(3): 726–747.
- [27] WANG W X, YU B, YAN X, et al. Estimation of innovation's green performance: a range-adjusted measure approach to assess the unified efficiency of China's manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 149(15): 919–924.
- [28] WANG C, NIE P Y, PENG D H, et al. Green insurance subsidy for promoting clean production innovation. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 148(1): 111–117.
- [29] YU W T, RAMANATHAN R, NATH P. Environmental pressures and performance: an analysis of the roles of environmental innovation strategy and marketing capability. *Technological Forecasting and Social Change*, 2017, 117: 160–169.
- [30] DAI R, ZHANG J X. Green process innovation and differentiated pricing strategies with environmental concerns of South-North markets. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 98: 132–150.
- [31] GUO L L, QU Y, TSENG M L. The interaction effects of environmental regulation and technological innovation on regional green growth performance. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 162(20): 894–902.
- [32] 许士春, 何正霞, 龙如银. 环境政策工具比较: 基于企业减排的视角. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(11): 2351–2362.
XU Shichun, HE Zhengxia, LONG Ruyin. Comparative research on environmental policy instruments: enterprise emission abatement perspective. *Systems Engineering – Theory & Practice*, 2012, 32(11): 2351–2362. (in Chinese)
- [33] LAZER D, PENDLAND A, ADAMIC L, et al. Computational Social Science. *Science*, 2009, 323(5915): 721–723.
- [34] ARFAOUI N, BROUILLAT E, JEAN M S. Policy design and technological substitution: investigating the REACH regulation in an agent-based model. *Ecological Economics*, 2014, 107: 347–365.
- [35] 关洪军, 赵爱武, 杜建国. 企业绿色技术创新行为研究. 北京: 经济科学出版社, 2017: 104–109.
GUAN Hongjun, ZHAO Aiwu, DU Jianguo. *Enterprise green technology innovation and behaviour*. Beijing: Economic Science Press, 2017: 104–109. (in Chinese)
- [36] ZEPPINI P, FRENKEN K, KUPERS R. Thresholds models of technological transitions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 2014, 11: 54–70.
- [37] 刘小峰, 盛昭瀚, 杜建国. 产品竞争与顾客选择下的清洁生产技术演化模型. *管理科学*, 2013, 26(6): 25–34.
LIU Xiaofeng, SHENG Zhaohan, DU Jianguo. Evolutionary model of cleaner production technologies under product competition and consumer choice. *Journal of Management Science*, 2013, 26(6): 25–34. (in Chinese)
- [38] 李勃昕, 韩先锋, 宋文飞. 环境规制是否影响了中国工业 R&D 创新效率. *科学学研究*, 2013, 31(7): 1032–1040.
LI Boxin, HAN Xianfeng, SONG Wenfei. Whether the environmental regulation can affect China's industrial R&D innovation efficiency. *Studies in Science of Science*, 2013, 31(7): 1032–1040. (in Chinese)

Simulation and Analysis of Optimal Policy Combination for Incentive of Enterprise Environmental Technology Innovation

ZHAO Aiwu^{1,2}, GUAN Hongjun¹

1 School of Management Science and Engineering, Shandong University of Finance and Economic, Jinan 250014, China

2 Computational Experiment Center of Social Science, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

Abstract: Enterprise environmental technology innovation is an important way to realize both objectives of sustainable economic development and environmental protection. Due to the existence of uncertainty and double externality in environmental innova-

tion, multiple environmental policies have become an important driving force to inspire enterprises implementing environmental innovation. At present, most of current researches only studied the influence of a single policy and thus difficult to reflect the interactions of combined effect.

Based on computational experimental method in social science, in this study, we construct a dynamic simulation model for enterprise environmental behavior. Through simulating the process of enterprise environmental innovation under different policies, we explore the impact of different combination of different environmental policies on enterprise environmental behavior.

In the paper, we firstly introduce the models corresponding reality scenarios. Based on the abstraction and simplification of realistic scenarios, we illustrate characteristics, behavior rules and interaction rules of related agents and explain the simulation process and related parameters. Then, according to the research problems, we set up a variety of experimental scenarios and respectively conduct the simulation. Finally, we analyze each experimental result.

The experiment results show that the enterprise's adoption of environmental innovation depends on the competitiveness of innovation products. Therefore, designing environmental policies should be based on the concern of promoting development of environmental innovation technology to reduce cost of adopting innovative technology and improve market expectation of innovative products. With the synergistic effects of market mechanism and competition among enterprises, when the market competitiveness of environmental innovative product is weak, the promoting effect of a single subsidy instrument would not be obvious. Thus the optimized combination of environmental instruments should be come up with. The study shows that strict environmental regulating taxes with innovative product subsidies can effectively promote enterprise environmental innovation. However, because of the increasing burden of environmental taxes, those enterprises whose funds are insufficient and technologies are backward would be eliminated during the technology conversion. On the other hand, the combination of looser environmental regulating taxes and innovation product subsidies can gradually promote enterprise environmental innovation while maintaining their normal operations. In this case, future environmental taxes increase enterprises' expectation for environmental innovation technology, thus more enterprises prepare to change to innovation technology in advance. Eventually, many of them can eventually change to innovation technology successfully.

This model can be used as a reference for designing environmental policies. By setting different policy scenarios and implementing simulation experiments, researcher may analyze the effects of different policies on enterprise's environmental innovation behavior for a short and long term.

Keywords: environmental technology innovation; environmental policy; computational experiment; economic performance; environmental performance

Received Date: June 5th, 2017 **Accepted Date:** February 13th, 2018

Funded Project: Supported by the Major Special Projects of the Social Science Fund(18VJ038)

Biography: ZHAO Aiwu, doctor in engineering, is an associate professor in the School of Management Science and Engineering at Shandong University of Finance and Economic and a member in the Computational Experiment Center of Social Science at Jiangsu University. Her research interests include complex system modeling, and computational experimental in social science. Her representative paper titled "Evolutionary trajectory and intrinsic mechanism of green purchase behavior" was published in the *Chinese Journal of Management Science* (Issue 11, 2015). E-mail: aiwuzh@126.com

GUAN Hongjun, doctor in engineering, is a professor in the School of Management Science and Engineering at Shandong University of Finance and Economic. His research interests cover management science theory and practice, e-commercial, and safety engineering. His representative publication titled "*Evolutionary trajectory and intrinsic mechanism of green purchase behavior*" is a monograph, published by the Economic Science Press in 2017 (ISBN 978-7-5141-7861-6). E-mail: jjxyghj@126.com □