

演化博弈视角下环境规制影响企业全要素生产率路径研究

——基于面板门槛模型的经验证据

程 柯¹, 金 典¹, 汪娱辉²

¹南京信息工程大学商学院, 江苏 南京

²浙江省诸暨市建设集团有限公司财务部, 浙江 诸暨

收稿日期: 2024年4月17日; 录用日期: 2024年5月15日; 发布日期: 2024年7月12日

摘 要

文章运用演化博弈理论, 分析政府环境规制与企业治污行为演化博弈过程及其可能存在的多重均衡, 提出环境规制强度与企业全要素生产率存在门槛效应假说。选取2011~2020年我国39个行业共3,221,580个样本工业企业构成的平衡面板数据与相关环境规制数据, 采用Levinsohn和Petrin (2003)估计方法测算企业全要素生产率, 使用面板门槛模型进行实证检验。经验证据表明: 1) 对于整体行业而言, 环境规制强度与企业全要素生产率之间存在倒U型关系, 即二者存在先升后降的关系。2) 将整体行业根据污染程度划分为低、中、高三类, 在轻度污染行业中二者为正相关; 在重度污染行业中二者为负相关; 而在中度污染行业中二者存在“U”型关系。研究发现支持门槛效应假说。环境规制强度对企业全要素生产率在不同行业产生不同的影响效应, 在演化博弈理论框架下得到合理的解释。

关键词

环境规制, 全要素生产率, 演化博弈, 门槛效应, 面板门槛模型

Research on the Impact Path of Environmental Regulation on Total Factor Productivity of Enterprises from the Perspective of Evolutionary Game

—Empirical Evidences Based on Panel Threshold Model

Ke Cheng¹, Dian Jin¹, Yuhui Wang²

¹School of Business, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu

文章引用: 程柯, 金典, 汪娱辉. 演化博弈视角下环境规制影响企业全要素生产率路径研究[J]. 电子商务评论, 2024, 13(3): 4142-4157. DOI: 10.12677/ecl.2024.133507

²Finance Department, Zhuji Construction Group Co., Ltd., Zhuji Zhejiang

Received: Apr. 17th, 2024; accepted: May 15th, 2024; published: Jul. 12th, 2024

Abstract

Using evolutionary game theory, this paper analyzes the evolutionary game process and possible multiple equilibrium between government environmental regulation and enterprise pollution control behavior, and puts forward the hypothesis that there is a threshold effect between the intensity of environmental regulation and enterprise total factor productivity. Select the balanced panel data and relevant environmental regulation data of 3,221,580 industrial enterprises in 39 industries in China from 2011 to 2020, use Levinsohn and Petrin (2003) estimation methods to calculate the total factor productivity of enterprises, and use the panel threshold model for empirical test. Empirical evidences show that: 1) For the whole industry, there is an inverted U-shaped relationship between the intensity of environmental regulation and the total factor productivity of enterprises, that is, the relationship between the two increases first and then decreases. 2) After the whole industry is divided into three categories: low, medium and high according to the degree of pollution, in the light pollution industry, the two are positively correlated; the two are negatively correlated in heavily polluted industries; There is a “U” relationship between the two in moderately polluting industries. The findings support the threshold effect hypothesis. The intensity of environmental regulations has different effects on the total factor productivity of enterprises in different industries, which can be reasonably explained in the framework of evolutionary game theory.

Keywords

Environmental Regulation, Total Factor Productivity, Evolutionary Game, Threshold Effect, Panel Threshold Model

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

改革开放 40 多年以来,以高投入、高耗能、高污染为特征的粗放型增长模式在推动我国经济快速发展的同时也带来诸如资源枯竭、污染严重、生态失衡等持续恶化的环境问题。不仅如此,粗放型增长模式所具有的“惯性”,使得我国企业被长期锁定在难以为继的要素驱动阶段,严重阻碍了向以技术、效率、创新等为主要驱动力量的集约增长模式升级转型。世界银行在《2030 年的中国》中认为,中国要跨越“中等收入陷阱”,需要把驱动经济增长的重心放在全要素生产率上[1]。如何在加强环境保护过程实现我国经济高质量发展,已引起党中央和国务院的高度重视。

习近平总书记指出,环境就是民生,绿水青山就是金山银山,决不能以牺牲生态环境为代价换取经济的一时发展,要加快生态文明体制改革,推进产业向低耗能的绿色生产方式发展,推动经济发展质量变革,提高全要素生产率[2]。2022 年 1 月,习近平总书记进一步指出,推进“碳达峰”“碳中和”工作是破解资源环境约束突出问题、实现可持续发展的迫切需要,是顺应技术进步趋势、推动经济结构转型

升级的迫切需要。具体到相关法律制度,加强生态文明建设和建设美丽中国的目标已载入宪法;制定土壤污染防治法、长江保护法等法律;修订环境保护法、水污染防治法等法律;已连续多年实行中央生态环境保护督察制度;等等。在顶层设计和战略部署下,我国环境保护取得显著成效。国务院关于2021年度环境状况和环境保护目标完成情况报告显示,2021年全国生态环境质量明显改善,环境安全形势趋于稳定。

企业作为一个国家或地区的基本生产单元,企业全要素生产率增长情况反映国家或地区的经济增长质量问题[3]。那么,环境规制对企业全要素生产率影响如何?究竟是促进提高还是阻碍制约?这一问题无疑关系到政府环境规制政策如何科学制定、精准发力,同时关系到企业如何实施创新驱动、实现高质量发展,具有重要的理论价值和实践意义。从文献检索结果来看,国内相关研究并不充分,有必要进一步考察我国环境规制对企业全要素生产率的影响机理,为之提供更为丰富的经验证据和理论解释。

本文的创新和贡献主要体现在:1) 理论分析方面,本文在演化博弈分析基础上提出门槛效应假说,丰富了现有理论假说,得到的经验发现也构成现有文献的增量证据。2) 研究方法方面,现有文献对于演化博弈模型推演的命题多采用参数赋值、数据仿真进行验证,参数数据为研究者人为设定、机械赋值,模拟结果稳健性较弱;且就信息贡献而言,验证环节已无信息增量,模拟数据信息不具有价值相关性,校验并非不可或缺。本文采用大样本实证检验可以从中间观察到经济主体运行轨迹,得到的经验发现具有较强的客观性和相关性,可为其他分析决策提供价值参考。

2. 文献综述

自从美国经济学家格罗斯曼和克鲁格(Grossman and Krueger, 1991)提出环境库兹涅茨曲线以来[4],环境规制与经济增长的关系受到国内外学者广泛关注,相关实证研究不断出现。

关于环境规制对全要素生产率影响实证检验,现有文献主要存在两种假说,即成本假说和波特假说。成本假说认为,环境规制会增加企业经营成本,抑制企业发展。如Jorgenson和Wilcoxon(1990)通过案例研究发现在实施的较短时期内,环境规制会导致企业生产率有所下降[5];Barbera和McConnell(1990)等在研究美国制造业数据时,发现在政府强制企业治理污染的政策施行下,企业生产率会被抑制[6]。波特等(Porter *et al.*, 1995)对成本假说提出质疑,认为实施环境规制对企业而言存在“创新补偿效应”和“学习效应”,企业可以通过绿色创新弥补用来治理环境的额外成本,同时提高企业生产绩效[7]。之后许多学者利用行业数据进行检验,得到的经验发现支持波特假说。如Hamamoto(2006)研究发现实施对环境的保护政策,对企业研发创新有刺激作用,从而提高生产率[8]。Rubashkina等(2015)以欧洲制造业为研究对象,发现生产率会随着污染被治理而得到提升[9]。

随着我国环境污染问题日益严峻,关于环境规制对于全要素生产率影响研究近年来逐渐引起国内学者的广泛关注。陈诗一(2010)研究证明实施节能减排的确能促进全要素生产率的提高[10]。王杰和刘斌(2014)研究发现环境规制与企业全要素生产率之间呈倒“N”型关系[11]。王兵和刘光天(2015)发现节能减排绩效是绿色生产率增长的核心动力,并且存在地区异质性,东部和中部地区效果更佳,西部地区面临环境和绿色经济双重恶化的困境[12]。

综上所述,现有文献关于环境规制对全要素生产率的影响机制并未形成统一的认识。从研究样本来看,现有文献较多使用省际、区域或行业等中观层面数据,较少使用微观企业层面数据,存在样本较少、自由度较低等局限,容易造成计量模型估计结果偏误;从理论分析来看,现有文献多基于成本假说和波特假说,理论分析基础相对单薄,环境规制对全要素生产率(尤其是对企业全要素生产率)影响微观机制并未得到充分揭示;从实证方法来看,现有文献多采用多元线性回归模型,环境规制对全要素生产率影响路径并未得到充分检验。鉴于此,本文以企业层面数据为基础,运用演化博弈理论分析环境规制与企业

治污行为策略博弈提出研究假说，在此基础上采用面板门槛模型进行实证检验。

3. 理论分析与研究假设

3.1. 环境规制系统的演化特征

从演化经济理论视角来看，由以政府为主的环境规制主体和以企业为主的规制客体构成的规制系统具有三个主要特征：第一，规制系统是动态、开放的，存在中央和省市等地方政府、不同行业企业等大量参与者。参与者的决策或行为随着生态环境、环保政策等变化而变化。第二，系统或系统里的某一变量(如企业全要素生产率)变化既具有一定的随机扰动性，如企业非理性行为，又有通过系统筛选机制(如市场选择机制、市场准入机制等)而呈现的规律性，系统演化结果虽然具有一定的不确定性，但很大程度上又带有因果性。第三，通过筛选机制生存下来特征具有一定的惯性，因而很多变量在较长的时间内会留下一个非常清楚的轨迹。

上述特征表明，政府环境规制与企业治污行为之间的作用机理可以运用演化博弈理论(Evolutionary Game Theory)分析。传统博弈论以完全理性、完全信息等为假设前提，条件较为苛刻。演化博弈论放松了这些假设，将博弈理论分析和动态演化过程分析结合起来，从达尔文生物进化理论和拉马克基因遗传理论中汲取思想，形成一套完整、严谨的分析范式，在分析制度生成、均衡解释等具有更强的适用性。

3.2. 基于调和博弈的演化模型

3.2.1. 模型构建

调和博弈(Coordination Game)是进行制度演化博弈分析主要工具之一[13]。与经典囚徒困境博弈模型(Prisoner's Dilemma Game)以理性人、互不信任和相互背叛等假设条件不同，调和博弈模型以博弈方相互信任、相互合作等为假设前提，符合政府环境规制和企业治污行为策略博弈的现实基础；模型所蕴含的复制动态方程契合政府环境规制和企业治污行为互动过程中的策略调整[14]。本部分以调和博弈模型为基础，表1给出政府与企业博弈支付矩阵。需要说明的是，政府关注的全要素生产率多属于国家、地区或行业等中宏观层面，而企业全要素生产率属于微观层面，二者性质一定存在差异，虽然国家、地区或行业的全要素生产率不等于企业全要素生产率的简单加总，但后者是构成前者的重要基础，为简化起见，此处将企业全要素生产率的改进视为政府和企业作为博弈方共同的收益(Payoff)。

表1中，假设政府选择低强度管制策略和企业采用低投入治污策略的收益是(1, 1)；政府选择高强度规制策略和企业采用高投入治污策略的收益是(μ , ν)，其中 $\mu, \nu > 1$ ；其他两种策略组合对应的收益分别为(1, 0)和(0, 1)。

Table 1. Government and enterprise game payment matrix

表 1. 政府与企业博弈支付矩阵

政府	企业	高投入治污策略 (η)	低投入治污策略 ($1-\eta$)
	高强度规制(η)	(μ , ν)	(0, 1)
	低强度管制($1-\eta$)	(1, 0)	(1, 1)

假设在政府选择高强度管制策略群体为 λ ，企业群体里选择高投入治污策略的比例为 η ，(λ , η)表示某一时点政府与企业可能存在的博弈状态，其运行的具体路径大体上可以体现政府与企业演化博弈所蕴含的规律特征。

政府选择高强度管制策略的期望值 U^H ，选择低强度管制策略的期望值 U^L ，期望值 $\bar{U}$ 分别为：

$$U^H = \eta\mu + (1-\eta) \times 0 \quad (1)$$

$$U^L = \eta \times 1 + (1-\eta) \times 1 \quad (2)$$

$$\bar{U} = \lambda U^H + (1-\lambda)U^L = \lambda\eta\mu + 1 - \lambda \quad (3)$$

同理，企业群体里选择高投入治污的期望值 V^H ，选择低水平策略的期望值 V^L ，期望值 $\bar{V}$ 分别为：

$$V^H = \lambda\nu + (1-\lambda) \times 0 \quad (4)$$

$$V^L = \lambda \times 1 + (1-\lambda) \times 1 \quad (5)$$

$$\bar{V} = \eta V^H + (1-\eta)V^L = \eta\lambda\nu + 1 - \eta \quad (6)$$

根据演化博弈理论，博弈双方会根据会不断地调整策略，即最初选择收益较低策略的主体会改变策略，转向(模仿)收益较高的策略，群体中采用不同策略的比例就会发生变化。博弈方学习模仿的速度取决于两个因素：一是模仿对象的数量大小，可用相应类型博弈方的数量比例大小来度量；二是模仿对象的成功程度，关系到判断差异的难易程度和对模仿激励的大小，可用模仿对象策略效用超过平均效用的程度表示。

上述演化思想可以用两个微分方程组成的系统来建模。假设一项策略选择的增长率取决于它的相对适应性，即只要一项策略选择适应性比群体平均适应性高，那么这一选择就会得到维系、强化和发展[15]。借鉴 Taylor 和 Jonker (1978)的模仿者动态模型[16]，选择高强度管制政府群体变化和采用高投入治污企业比例增长率可用以下复制动态方程(replicated dynamic equation)表示：

政府选择高强度管制的复制动态方程为：

$$\frac{d\lambda}{dt} = \lambda \cdot U^H \cdot (U^H - \bar{U}) = \lambda(1-\lambda)(\mu\eta - 1) \quad (7)$$

企业选择高投入治污群体复制动态方程为：

$$\frac{d\eta}{dt} = \eta \cdot V^H \cdot (V^L - \bar{V}) = \eta(1-\eta)(\nu\lambda - 1) \quad (8)$$

式(7)表明，当 $\lambda = 0, 1$ 或 $\eta = 1/\mu$ 时，政府选择高强度环境规制比例是稳定的。同理，式(8)表明，当 $\eta = 0, 1$ 或 $\lambda = 1/\nu$ 时企业选择高治污投入群体是稳定的。

3.2.2. 模型的均衡解

按照 Friedman (1991)提出的方法[15]，对于一个由微分方程系统描述的群体动态，其均衡点的稳定性可由这个系统得到的雅可比(Jacobian)矩阵的局部稳定分析得到。由此，本文使用雅可比矩阵的局部稳定分析方法研究方程(7)和方程(8)组成的系统的稳定性。

方程(7)和方程(8)组成系统的雅可比矩阵行列式为：

$$\det J = (\mu\eta - 1)(1 - 2\lambda)(\nu\lambda - 1)(1 - 2\eta) - \mu\nu\lambda\eta(1 - \lambda)(1 - \eta) \quad (9)$$

雅可比矩阵的迹(Trace)为：

$$\text{tr } J = (\mu\eta - 1)(1 - 2\lambda) + (\nu\lambda - 1)(1 - 2\eta) \quad (10)$$

由以上分析，方程(7)和方程(8)组成系统有 5 个局部平衡点，演化稳定策略(Evolutionary Stable Strategy, ESS)要求具有抗扰动功能，即当 x 向低于 x^* 水平偏离时，应当有 $F(x) > 0$ ；当 x 向高于 x^* 的水平偏离时，应当有 $F(x) < 0$ ；即数学上要求 $F(x)$ 的导数 $F'(x) < 0$ 。使用雅可比矩阵的局部稳定分析法对 5 个

局部平衡点进行稳定性分析, 其结果如表 2 所示。

Table 2. Results of local stability analysis

表 2. 局部稳定分析结果

均衡点	det J		tr J		结果
$\lambda=0, \eta=0$	1	+	-2	-	ESS
$\lambda=0, \eta=1$	$\mu-1$	+	μ	+	不稳定
$\lambda=1, \eta=0$	$\nu-1$	+	ν	+	不稳定
$\lambda=1, \eta=1$	$(\mu-1)(\nu-1)$	+	$2-\mu-\nu$	-	ESS
$\lambda=1/\nu, \eta=1/\mu$	$-(1-1/\mu)(1-1/\nu)$	-	0		鞍点

由表 2 可知, 系统的 5 个局部平衡点仅有 2 个是稳定的, 为 $(\lambda=0, \eta=0)$ 和 $(\lambda=1, \eta=1)$, 属于演化稳定战略(ESS)。另外, 由方程(7)和方程(8)组成的系统还有两个不稳定平衡点, 为 $(\lambda=0, \eta=1)$ 和 $(\lambda=1, \eta=0)$; 一个鞍点 $(\lambda=1/\nu, \eta=1/\mu)$ 。

3.2.3. 模型结论

图 1 描述政府环境规制和企业治污行为演化博弈过程。由两个不稳定平衡点 A $(1, 0)$; B $(0, 1)$ 及鞍点 C $(1/\nu, 1/\mu)$ 连成的折线(A-C-B)可以看成系统收敛于不同状态的临界线, 位于该折线左边的所有点收敛于低支出、低强度规制策略行为组合; 位于该折线右边的所有点收敛于高支出、高强度策略行为组合。特别地, 当初始状态落 C 点附近时, 则最终的均衡状态取决于博弈双方学习、调整的速度。

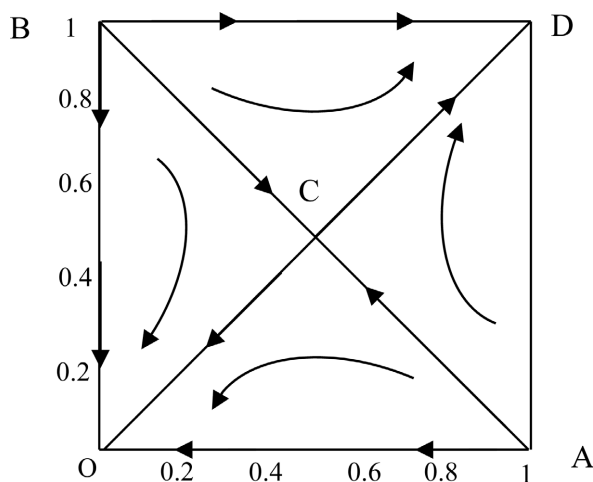


Figure 1. The dynamic process of the government-firm evolutionary game ($\mu = \nu = 2$)

图 1. 政府与企业演化博弈动态过程($\mu = \nu = 2$)

在图 1 中, $\mu = \nu = 2$, 即模型中政府环境高强度规制、高治污支出策略组合的得益分别是低强度规制、低治污支出策略组合得益的 2 倍, 此时系统收敛于两种模式的概率相同(均为 0.5, 如图中 C 点所示)。

假定其他条件不变, 政府与企业选择高强度规制、高治污支出的策略组合的相对得益增加时(如 $\mu = \nu = 4$), 此时 C 向左下方移动到 C' (如图 2 所示), 收敛于高强度规制、高治污支出的概率超过收敛于高强度规制、高治污支出策略的概率(即由折线 A-C'-B-D 围成的面积增大, 群体初始状态落入此区域

概率变大), 鞍点从 C 到 C' 构成政府与企业策略选择的演化路径之一。

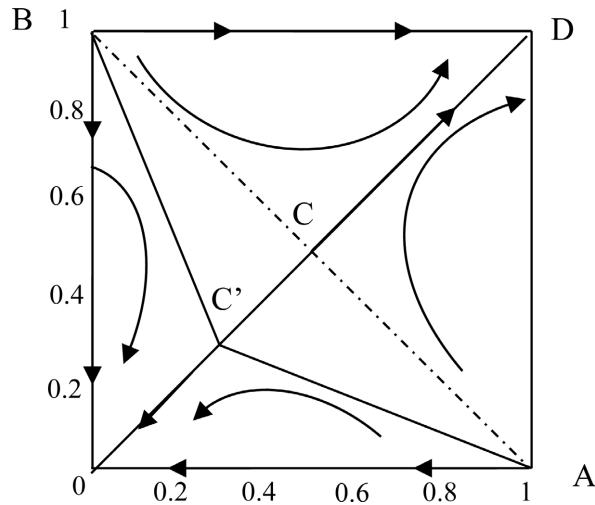


Figure 2. The dynamic process of the government-firm evolutionary game ($\mu = \nu = 4$)
图 2. 政府与企业演化博弈动态过程($\mu = \nu = 4$)

3.2.4. 研究假说

调和博弈演化模型表明, 政府环境规制与企业治污策略选择之间的演化博弈可能存在多重均衡。从群体运行特征来看, 有限理性的主体不具备完全信息, 不能够完全认知自己所处的利害状态, 适应于不同环境存活的行为模式被不同群体内部个体不断模仿、采用。对于企业治污行为而言, 最有利于存活的行为模式既可能是与低治污支出相应的低成本生存之道, 也可能是由高治污支出而蕴含的“创新补偿效应”和“学习效应”。

企业治污行为选择的自发演化依赖于高支出治污策略与低支出治污策略的相对得益, 而相对得益又受到环境规制强度的影响或制约。与自然界“优胜劣汰”选择机制不同, 在企业行为演化过程中, 不仅存在“优胜劣汰”情形, 还可能存在“劣胜优汰”情形(如经济增长方式锁定在要素驱动模式)。因此, 不同行业企业群体治污行为在不同环境规制强度作用下, 其演化路径及其经济后果存在较大的差异性。但无论如何, 过高的环境规制强度和过高的治污支出对于企业和政府都不会是最优均衡结果。综上, 本文提出待检验假说 H1 和 H2。

H1: 对于行业整体而言, 环境规制强度与企业全要素生产率存在门槛效应。

H2: 对于污染程度不同行业而言, 环境规制影响企业全要素生产率路径不同, 二者可能存在正相关、负相关或门槛效应。

4. 实证设计

本文运用 Hansen (1999)提出的面板门槛模型[17], 选取 2011~2020 年中国工业企业由 39 个行业共 3,221,580 观测值构成的平衡面板数据, 对假说 H1 和 H2 进行实证检验。所有数据均从国家统计局 2011~2020 年《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》以及中国工业企业调查数据库。本文选取样本时删除少量工业总产值、工业增加值、固定资产、从业人员等数值缺失的样本。数据处理主要软件是 Stata16。

4.1. 主要指标度量

本文主要指标包括全要素生产率、污染行业划分和环境规制强度。

4.1.1. 全要素生产率测算

现有文献从宏观(国家)、中观(行业或地区)、微观(企业)三个层面采用不同方法对全要素生产率进行核算。本文以 Levinsohn 和 Petrin (LP, 2003)模型为基础[18], 借鉴鲁晓东和连玉君(2012)做法[19], 将企业全要素生产率测算模型设定如下:

$$\ln Y_{it} = \beta_0 + \beta_k \ln K_{it} + \beta_l \ln L_{it} + \beta_m \ln M_{it} + \sum \delta_m Year_m + \sum \gamma_n Ind_n + \varepsilon_{it} \quad (11)$$

相关变量的具体定义和计算方法概括如表 3 所示(含后文检验模型中变量)。*Year* 代表时间固定效应, *Ind* 代表行业固定效应。同时, LP 法将中间投入(*M*)作为代理变量, 并设置反映企业经营生存状况的企业退出变量(*Exit*)。

Table 3. Description of variables

表 3. 变量说明

名称	符号	定义或计算方法
测算模型:		
劳动投入	<i>L</i>	员工数量, 取自然对数(ln <i>L</i>)
资本投入	<i>K</i>	固定资产净额, 取自然对数(ln <i>K</i>)
中间投入	<i>M</i>	企业营业成本加上销售费用、管理费用、财务费用再减去当期计提的折旧与摊销以及支付给职工和为职工支付的现金, 取自然对数(ln <i>M</i>)
产出	<i>Y</i>	营业收入, 取自然对数(ln <i>Y</i>)
检验模型:		
全要素生产率	<i>TFP</i>	测算模型测度结果
环境规制强度	<i>ER</i>	废水废气本年处理及设施运行费用/本年营业收入
技术创新	<i>TI</i>	R&D 经费内部支出自然对数化处理
外商直接投资	<i>FDI</i>	外商资本自然对数化处理
规模结构	<i>SC</i>	企业总资产/行业总资产
人均资本	<i>PC</i>	固定资产净值/员工数
能源生产率	<i>EP</i>	营业收入/能源消耗量

4.1.2. 污染程度分类

我国工业污染物排放具有较强的行业特征, 不同工业行业在污染物排放种类、数量和强度等方面都存在差异。为便于比较, 本文借鉴王杰、刘斌(2014)方法测算不同行业污染程度[11], 进而对其分类。具体步骤如下:

首先, 根据公式 $UE_{ij} = E_{ij}/O_i$, 用各行业主要污染物排放量, 主要有废水排放量、二氧化硫排放量、烟尘粉尘排放量等, 除以工业总产值, 以此得出单位产值产生污染物。

其次, 把上述计算结果线性标准化:

$$UE_{ij}^S = \frac{UE_{ij} - \min(UE_j)}{\max(UE_j) - \min(UE_j)} \quad (12)$$

其中, UE_{ij}^S 为标准化数值, $\max(UE_j)$ 和 $\min(UE_j)$ 分别为污染物指标 *j* 在全行业的最大值和最小值。

最后, 利用上述公式计算各污染物算数平均值, 再将其汇总后, 得到不同行业污染物排放强度 γ_i :

$$\gamma_i = \frac{\sum_{j=1}^n UE_{ij}^S}{n} \tag{13}$$

按照上述步骤，本文根据污染强度将 39 个行业进行分类，如表 4 所示。

Table 4. Industry classification table according to the pollution intensity
表 4. 按照污染强度行业分类表

分类	污染物排放强度	行业
重度污染行业	$\gamma_i \geq 0.43$	煤炭采选、黑金矿采、有金矿采、纺织业、造纸业、石油加工、化学原料、化学纤维、非金属制造、黑金加工、有金加工、电力热力生产
中度污染行业	$0.02 < \gamma_i < 0.43$	石油开采、非金属矿采、其他矿采、农副加工、食品制造、饮料制造、皮羽制品、文体用品、医药制品、塑料制品、金属制品、交通设备、工艺品、回收加工、燃气生产、水的生产
轻度污染行业	$\gamma_i \leq 0.02$	烟草制品、服装业、木材加工、家具制造、印刷业、橡胶制品、通用设备、专用设备、电气机械、通信设备、仪器仪表

资料来源：笔者计算整理。

4.1.3. 环境规制强度衡量

现有文献在计算环境规制强度时，尚未形成统一标准。本文参考吕康娟等(2017)测算方法[20]，用单位产值耗费的用于环境治理的费用来衡量。需要说明的是，固体废弃物分为一般工业废物和危险废物，一般工业废物主要采用填埋、焚烧或固化技术；如果是危险废物，企业必须将其交由具有相关资质证书的专门机构进行无害化处理，这两类固体废弃物相关数据难以获取。因此，本文选取了废水废气的相关处理费用数据，计算公式如下：

$$\text{环境规制强度} = \text{废水废气本年处理及设施运行费用} / \text{本年工业总产值} \tag{14}$$

图 3 显示的是 2011~2020 年中国工业企业不同行业的环境规制强度，从中可以看出，不同污染程度的行业中实施的政策存在很大差异，工业企业整体处于中等水平，而重度污染行业大大超过全行业的实

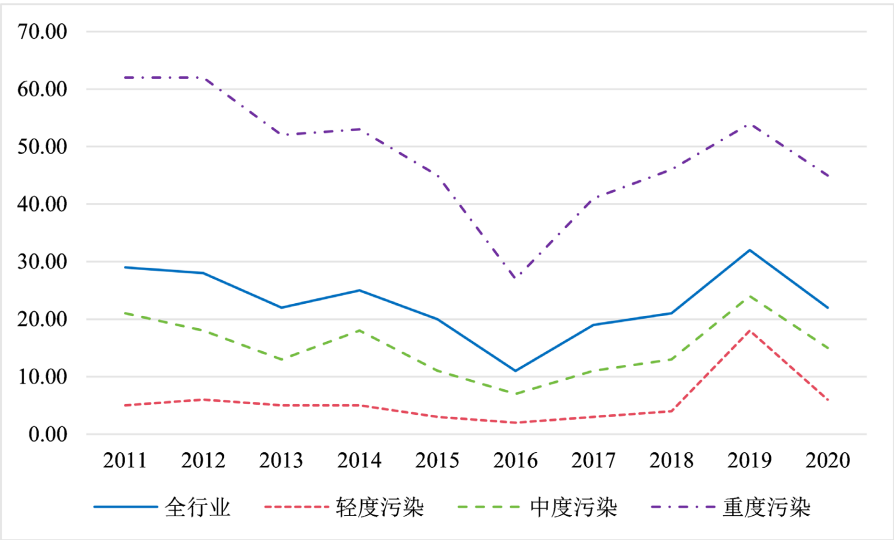


Figure 3. Comparison of environmental regulation intensity changes in industries with different pollution levels
图 3. 污染程度不同的行业环境规制强度变化对比

施力度,中度和轻度污染行业处于较低的环境规制水平。之所以造成这种现象,是因为环境规制的实施和行业的污染情况有密切的关系,政府对于污染严重的行业会施行更严格的政策,反之则较为宽松。

4.2. 门槛模型设定

现有文献解释变量和被解释变量之间非线性关系时,通常在计量模型中加入解释变量的平方项、立方项等高次项,或是进行分组检验。前者可能会产生多重共线性问题,而后者在选择分组标准时会带有主观判断性。采用面板门槛回归模型能够有效克服上述不足,且与演化理论推演逻辑相契合。本文将面板门槛模型设定如下:

$$TFP_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 ER_{it} \cdot I(ER_{it} \leq \gamma) + \alpha_2 ER_{it} \cdot I(ER_{it} > \gamma) + \beta_1 \ln TI_{it} + \beta_2 \ln FDI_{it} + \beta_3 SC_{it} + \beta_4 PC_{it} + \beta_5 EP_{it} + \varepsilon_{it} \quad (15)$$

其中, i 代表企业, t 代表年份, ε_{it} 为随机扰动项, $I(\cdot)$ 为示性函数。 TFP_{it} 表示第 i 个企业在第 t 年的全要素生产率, ER_{it} 表示环境规制强度, TI_{it} 、 FDI_{it} 、 SC_{it} 、 PC_{it} 、 EP_{it} 作为控制变量,分别衡量企业技术创新水平、外商直接投资额、规模结构、人均资本和能源生产率。

5. 实证结果

5.1. 描述性统计分析

为了分析企业 TFP 随时间变化的发展趋势,本文采用核密度法进行考察,并对各年企业 TFP 的均值、中位数进行了计算和描述性统计,如图 4 和表 5 所示。图 4 中可见,从 2011 年到 2020 年曲线逐渐向右移动,说明我国工业企业全要素生产率在观察期内呈逐渐上升的趋势。

表 6 为主要变量的描述性统计。各变量统计特征与王杰等(2014)文献大体一致。

5.2. 门槛效应检验

本文采用自助抽样法(Bootstrap Method)来检验环境规制强度对企业 TFP 是否存在门槛效应,设定的

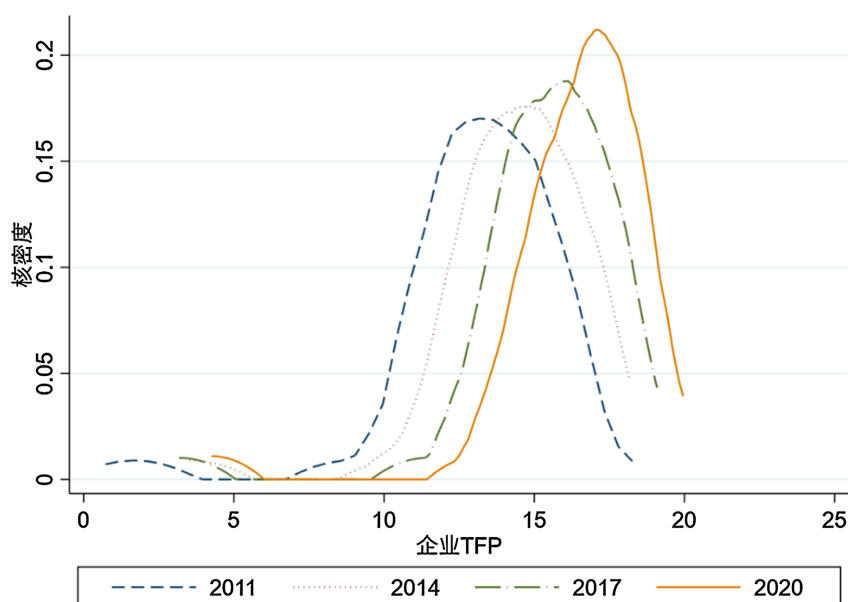


Figure 4. Enterprise TFP kernel density distribution

图 4. 企业 TFP 核密度分布

Table 5. Descriptive statistics of TFP of industrial firms
表 5. 工业企业 TFP 描述性统计

年份	中位数	均值
2011	10.187	10.192
2014	10.341	10.327
2017	10.453	10.424
2020	10.578	10.593

Table 6. Descriptive statistics of main variables
表 6. 主要变量描述性统计

变量	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
<i>TFP</i>	3,221,580	10.379	1.723	4.31	14.78
测算模型主要变量:					
<i>lnL</i>	3,221,580	9.518	1.43	2.944	11.42
<i>lnK</i>	3,221,580	15.064	1.526	7.736	18.292
<i>lnM</i>	3,221,580	14.592	4.076	0	18.801
<i>lnY</i>	3,221,580	18.063	1.749	9.961	21.54
检验模型主要变量:					
<i>ER</i>	3,221,580	22.776	31.161	0.001	183.12
<i>SC</i>	3,221,580	0.026	0.024	0.001	0.104
<i>PC</i>	3,221,580	39.106	45.717	3.13	325.92
<i>FDI</i>	3,221,580	14.133	2.94	0.001	17.597
<i>EP</i>	3,221,580	9.9	9.681	0.04	46.86
<i>TI</i>	3,221,580	12.848	3.336	0.001	16.811

Table 7. Threshold effect test of environmental regulation intensity and total factor productivity
表 7. 环境规制强度与全要素生产率的门槛效应检验

行业类型	门限类型	F 值	p 值	F 统计量临界值			门槛值	95%置信区间
				10%	5%	1%		
整体行业	单一门槛	20.77	0.097	20.433	25.431	34.899	27.190	(26.990, 27.360)
重度污染行业	无门槛	6.36	0.467	13.717	16.530	21.926	130.600	(128.870, 132.870)
中度污染行业	单一门槛	23.15	0.046	19.070	22.366	34.663	0.950	(0.930, 1.290)
轻度污染行业	无门槛	5.08	0.680	11.561	15.126	23.180	3.360	(3.290, 3.410)

次数为 1000 次，检验得出的基本统计量数值如表 7 所示。从检验结果可以看出，企业整体在 10%的显著性水平下通过了单一门槛的检验，这说明从工业企业整体角度看，环境规制强度与全要素生产率之间存在显著门槛效应，即二者有着非线性关系。在不同类别行业中，只有中度污染行业通过了单一门槛检验，且显著性水平为 5%。由此可以说明，环境规制强度与全要素生产率关系在中度污染行业中为非线性，而在重度和轻度污染行业中为线性。接下来将通过面板回归模型进一步检验两者关系。

5.3. 模型回归结果

在门槛效应已检验存在的基础上，为进一步考察环境规制强度对不同污染程度行业的线性及非线性关系，本文运用面板门槛回归模型进行参数估计。

表 8 是工业企业整体的参数估计结果，环境规制的估计系数为 0.014 和-0.006 (均在 1%水平下显著)，说明在其低于门槛值 27.190 时，产生影响的方向为正向，即有利于生产率提升，一旦超过这一门槛值，其影响变为负向，即抑制了企业全要素生产率。这表明如果企业对环境的治理超过一定程度，就会增加其经营负担，反而不利于企业的发展。

控制变量中，技术创新水平、规模结构、人均资本和能源生产率都对生产率有着正向影响，说明当企业 R&D 经费内部支出增加、规模结构扩大、人均资本增加和能源生产率提高时，企业全要素生产率会随之提升。而外商直接投资对全要素生产率产生负向影响，可能的原因是污染天堂假说(Pollution Haven Hypothesis, PHH)在我国工业企业中成立；即企业整体来看，外商对华投资有污染企业转移倾向。

Table 8. Overall firm regression results
表 8. 整体企业回归结果

变量	ER 为门槛变量
	TFP
ER ≤ 27.190	0.014*** (2.61)
ER > 27.190	-0.006*** (-2.96)
SC	4.532 (0.50)
PC	0.033*** (14.90)
FDI	-0.250*** (-5.00)
EP	0.111*** (11.39)
TI	0.601*** (8.60)
常数项	8.148*** (7.78)
行业固定效应	YES
年度固定效应	YES
R-squared	0.752
F 值	149.2
观测值	3,221,580

注：括号内为 t 值，***表示 p < 0.01，**表示 p < 0.05，*表示 p < 0.1。

本文在研究整个工业企业的基础上，根据污染程度不同划分的三大类不同行业，分别进行了回归分析，得出结果如表 9 所示。

(1)列显示的是重度污染行业门槛回归模型的参数估计结果，其系数为-0.007 (在 5%水平下显著)，代表在政策实施力度增加 1 单位值时，企业生产率会相应降低 0.007 单位值。这说明在短期内，重度污染

行业为了达到污染物排放标准，增加了环境治理成本，而由环境改善或生产工艺创新带来的收益还无法在短期内体现出来，因此产生了负面影响。

Table 9. Regression results by industry according to pollution level
表 9. 根据污染程度分行业回归结果

变量	(1) 重度污染行业企业	(2) 中度污染行业企业	(3) 轻度污染行业企业
	<i>TFP</i>	<i>TFP</i>	<i>TFP</i>
<i>ER</i>	-0.007** (-2.52)		0.001 (0.45)
<i>ER</i> ≤ 0.9500		-2.270*** (-4.60)	
<i>ER</i> > 0.9500		0.003 (0.88)	
<i>SC</i>	23.261** (2.27)	-5.097 (-0.37)	33.764* (1.92)
<i>PC</i>	-0.001 (-0.33)	0.018*** (7.04)	0.070*** (7.00)
<i>FDI</i>	-0.277 (-1.62)	-0.293*** (-4.09)	-0.128*** (-2.85)
<i>EP</i>	-0.159 (-1.22)	0.059*** (3.52)	0.063*** (4.96)
<i>TI</i>	-0.258 (-0.96)	0.416*** (6.07)	0.931*** (8.85)
常数项	22.024*** (5.02)	2.438** (2.49)	0.466 (0.29)
行业固定效应	YES	YES	YES
年度固定效应	YES	YES	YES
R-squared	0.897	0.598	0.894
F 值	54.07	29.16	130.2
观测值	1,002,760	1,097,580	1,121,240

注：括号内为 t 值，***表示 $p < 0.01$ ，**表示 $p < 0.05$ ，*表示 $p < 0.1$ 。

从控制变量上来看，人均资本抑制了企业全要素生产率，根据现有研究，随着人均资本增大，企业很有可能转变为资本密集型，而由于其产生的污染更为严重，所需用于治理环境的支出增加，不利于生产率的提高。技术创新对企业全要素生产率有负向作用但不显著，这说明对于重度污染行业，增加创新经费的投入并不能使其完成生产技术革新，反而影响了生产效率。

(2)列显示的是中度污染行业门槛回归模型的参数估计结果，环境规制强度的估计系数为一负一正。当其在门槛值范围内时，参数估计值为-2.270 (在 1%水平下显著)，当超过门槛值 0.950 时，其系数值为 0.003 但不显著。说明当实施的环境规制水平较低时，会抑制全要素生产率，随着实施力度增加到一定程度，对全要素生产率起促进作用，总体呈“U”型特征。可能的解释是中度污染行业既不像轻度污染行业具有技术优势，又不如重度污染行业有资本优势，所以企业很难在短期内承受治理环境带来的费用上的压力。但随着环境规制实施力度加大，用于治理污染的成本变高，企业不得不考虑通过技术改革和管

理创新,改善生产效率并减少污染排放,从而提高全要素生产率。

从控制变量上来看,人均资本产生的影响显著为正,说明对中度污染行业而言,资本深化能促进生产率提高。同时,技术创新对其也有显著正向作用,这表明技术创新可以实现生产方式的改革,实现高质量绿色生产,以此提高企业生产率水平。

(3)列显示的是轻度污染行业门槛回归模型的参数估计结果,从表中可以看到,环境规制对其生产率有正向影响,每增加 1 单位强度,就会提高 0.001 单位值的生产率。产生这一结果的原因可能与其行业特征有关,轻度污染行业多为轻工业,技术水平较高,污染排放较少,实施环境规制时,可以有效地通过技术创新实现污染物治理与生产率提升的目标。

从控制变量上来看,能源生产率产生显著正向影响,这一结果表明提高能源利用效率可以有效提升企业的生产率。

5.4. 稳健性检验

检验模型刻画的是单门槛模型,鉴于门槛模型可能会存在多门槛情形,为此笔者进行了双门槛效应检验,双门槛检验模型设定如下:

$$TFP_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 ER_{it} \cdot I(ER_{it} \leq \gamma_1) + \alpha_2 ER_{it} \cdot I(\gamma_1 < ER_{it} < \gamma_2) + \alpha_3 ER_{it} \cdot I(ER_{it} \geq \gamma_2) + \beta_1 \ln TI_{it} + \beta_2 \ln FDI_{it} + \beta_3 SC_{it} + \beta_4 PC_{it} + \beta_5 EP_{it} + \varepsilon_{it} \quad (16)$$

其中, $\gamma_1 < \gamma_2$ 。结果显示,双门槛效应在样本中并不显著,具体结果从略。此外,笔者还采用 Olley 和 Pakes 测算企业全要素生产率方法(OP 法, 1996) [21], 重复上述检验过程,结论基本不变。

6. 研究结论

6.1. 主要发现

本文选取 2011~2020 年我国 39 个行业共 3,221,580 个样本工业企业构成的平衡面板数据与相关环境规制数据,采用 LP 估计方法测算企业全要素生产率,考察了环境规制对于企业全要素生产率的不同影响。研究发现:对于工业企业整体而言,环境规制对企业全要素生产率先为正向后为负向影响,其趋势呈倒“U”型;在重度和轻度污染行业中,环境规制强度与企业全要素生产率不存在非线性关系,分别起到抑制和促进作用;中度污染行业通过了单一门槛检验,环境规制强度对企业全要素生产率的影响先为负向后为正向,即“U”型门槛效应特征。

6.2. 政策启示

首先,应进一步建立健全环境相关法制体系。我国生态环境保护存在的突出问题,大都与制度不完善、机制不健全、法治不完备有关[2]。政府要对政策拟定思路有所创新,制定污染治理与经济增长相结合的指标,以此对企业进行考核。通过实施环境规制政策,不仅对企业污染排放进行约束,还要据此设立行业准入门槛,只有符合污染物排放标准的企业才允许进入市场。

其次,对于不同类别工业企业,应实施差异化环境规制政策。在不同污染程度的工业企业中,环境规制对其企业全要素生产率的影响路径不同,政府在实施境规制时应根据不同类别行业的具体情况制定不同强度的政策。为此,政府环境规制必须宽严有度。既要使得环境规制达到治理环境污染的目的,又不能因为政策过于严苛而阻碍企业正常经营,只有如此才能全面提高我国企业全要素生产率,实现经济高质量发展。具体而言:1) 对于重度污染行业,现有的环境规制力度较弱,抑制了其生产率的提升,可能的解释是由于其污染排放量较大而环境规制强度未达到一定强度,不能对企业通过技术创新进行环境治理起到激励作用,环境规制的实施增加了额外支出从而使生产率下降。对这类行业需要制定更为严格

的环境规制,迫使企业不得不依靠技术创新和产业结构调整治理环境污染,否则将面临被淘汰的风险。

2) 对于中度污染行业,环境规制与全要素生产率呈先抑制后促进的关系,因此在现有强度的基础上,要进一步增强对这类行业实施的环境规制,使得由于治理环境的高昂代价,对其创新形成足够的激励作用,跨过门槛值,促进生产率的提升。3) 对于轻度污染行业,目前环境规制会促进生产率的提升,由于其多为技术密集型产业、自身污染排放少,现有的环境规制能对其技术创新和效率改进提供持续的激励,但也正因为此,其环境污染问题容易被忽略,因此仍有必要适当加大环境规制强度,激发其绿色研发动力。

最后,应建立环境规制政策执行的动态调整机制。习近平总书记指出,经济发展不是对资源和生态环境的竭泽而渔,生态环境保护也不应是舍弃经济发展的缘木求鱼,而是要坚持在发展中保护、在保护中发展[2]。环境规制与企业治污行为演化的动态复杂性,决定了必须实行最严格环境保护制度、在原则性问题上不能越雷池一步的同时,也应具备动态调整机制,使得环境规制与企业全要素生产率提高最终实现双赢。

6.3. 研究局限

本文尚存一些不足之处。首先,本文关注的全要素生产率、环境规制强度和污染程度等主要变量,现有文献均提供多种度量方法,尽管笔者在选择时进行权衡,但这种权衡很大程度上只是一种次优选择,由此多个变量难免存在统计误差及其“叠加”从而影响最终结果。其次,我国政府层级从中央到乡镇可分为多个级次,不同层级政府因利益诉求不完全相同可能存在非合作现象,已有文献揭示不同地方政府由于非合作导致总体经济增长质量低下,并外显为全要素生产率增长的损害[22];本文将政府视为一个群体,未来可进一步观察不同层级政府环境规制对企业全要素生产率影响差异。此外,演化经济学在分析经济增长、产业演化、技术变迁与制度创新等宏观微观问题具有较强的理论优势,这些问题与本文研究主题有着或多或少的关联,演化博弈论是演化经济学一个重要分支,本文将其作为主要理论工具是否同样具有分析优势,以及由理论模型推演的假说命题与其检验模型匹配的科学性,有待于进一步的探讨与检验。

基金项目

2024 年教育部第三期供需对接就业育人项目(申请编号:2024033162470;用人单位:北京顺泽博创科技有限公司);2023 年度江苏省研究生科研与实践创新计划项目;2022 年江苏高校哲学社会科学研究重大项目(项目编号:2022SJD007);南京信息工程大学中国制造业发展研究院 2018 年开放课题(项目编号:SK20180090-19)。

参考文献

- [1] World Bank. China 2030: Building a Modern, Harmonious, and Creative Society. <https://www.drc.gov.cn/tmpuploadfiles/china2030.pdf>
- [2] 习近平. 习近平新时代中国特色社会主义思想三十讲[M]. 北京: 学习出版社, 2018.
- [3] 刘建翠. 中国的全要素生产率研究: 回顾与展望[J]. 技术经济, 2022, 41(1): 77-87.
- [4] Grossman, G.M. and Krueger, A.B. (1991) Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. NBER Working Papers. National Bureau of Economic Research, Cambridge.
- [5] Jorgenson, D.W. and Wilcoxon, P.J. (1990) Environmental Regulation and U.S. Economic Growth. *The RAND Journal of Economics*, 21, 314-340. <https://doi.org/10.2307/2555426>
- [6] Barbera, A.J. and McConnell, V.D. (1990) The Impact of Environmental Regulations on Industry Productivity: Direct and Indirect Effects. *Journal of Environmental Economics and Management*, 18, 50-65. [https://doi.org/10.1016/0095-0696\(90\)90051-y](https://doi.org/10.1016/0095-0696(90)90051-y)
- [7] Porter, M.E. and van der Linde, C. (1995) Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relation-

- ship. *Journal of Economic Perspectives*, **9**, 97-118. <https://doi.org/10.1257/jep.9.4.97>
- [8] Hamamoto, M. (2006) Environmental Regulation and the Productivity of Japanese Manufacturing Industries. *Resource and Energy Economics*, **28**, 299-312. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2005.11.001>
- [9] Rubashkina, Y., Galeotti, M. and Verdolini, E. (2015) Environmental Regulation and Competitiveness: Empirical Evidence on the Porter Hypothesis from European Manufacturing Sectors. *Energy Policy*, **83**, 288-300. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.02.014>
- [10] 陈诗一. 中国的绿色工业革命: 基于环境全要素生产率视角的解释(1980-2008) [J]. 经济研究, 2010, 45(11): 21-34, 58.
- [11] 王杰, 刘斌. 环境规制与企业全要素生产率——基于中国工业企业数据的经验分析[J]. 中国工业经济, 2014(3): 44-56.
- [12] 王兵, 刘光天. 节能减排与中国绿色经济增长——基于全要素生产率的视角[J]. 中国工业经济, 2015(5): 57-69.
- [13] 盛昭翰, 蒋德鹏. 演化经济学[M]. 上海: 三联书店, 2002.
- [14] 程柯. 民营企业社会责任履行多群体演化博弈分析[J]. 经济与管理, 2018, 32(4): 62-67.
- [15] Friedman, D. (1991) Evolutionary Games in Economics. *Econometrica*, **59**, 637-666. <https://doi.org/10.2307/2938222>
- [16] Taylor, P.D. and Jonker, L.B. (1978) Evolutionary Stable Strategies and Game Dynamics. *Mathematical Biosciences*, **40**, 145-156. [https://doi.org/10.1016/0025-5564\(78\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0025-5564(78)90077-9)
- [17] Hansen, B.E. (1999) Threshold Effects in Non-Dynamic Panels: Estimation, Testing, and Inference. *Journal of Econometrics*, **93**, 345-368. [https://doi.org/10.1016/s0304-4076\(99\)00025-1](https://doi.org/10.1016/s0304-4076(99)00025-1)
- [18] Levinsohn, J. and Petrin, A. (2003) Estimating Production Functions Using Inputs to Control for Unobservables. *Review of Economic Studies*, **70**, 317-341. <https://doi.org/10.1111/1467-937x.00246>
- [19] 鲁晓东, 连玉君. 中国工业企业全要素生产率估计: 1999-2007 [J]. 经济学(季刊), 2012, 11(2): 541-558.
- [20] 吕康娟, 程余, 范冰冰. 环境规制对中国制造业绿色全要素生产率的影响分析[J]. 生态经济, 2017, 33(4): 49-52.
- [21] Olley, G.S. and Pakes, A. (1996) The Dynamics of Productivity in the Telecommunications Equipment Industry. *Econometrica*, **64**, 1263-1297. <https://doi.org/10.2307/2171831>
- [22] 苏洪, 刘渝琳, 吴颖. 区域财政支出协调机制的联盟博弈分析——以全要素生产率增长为目标[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2015, 21(5): 9-15.