

# Research on the Mechanism of Environmental Regulation Empowering Green Total Factor Productivity in the Context of Artificial Intelligence

Lihua Peng Xingtong Lin Qiuhan Luo

School of International Business South China Normal University, Foshan, Guangdong, 528200, China

## Abstract

The rapid development of the artificial intelligence industry has provided new insights for traditional environmental regulation. Based on panel data from 281 prefecture-level cities in China from 2012 to 2024, this paper examines the impact mechanisms of different types of environmental regulations on green total factor productivity (GTFP) in the context of the AI era. The study finds that command-and-control environmental regulations may inhibit GTFP growth by increasing corporate compliance costs, while market-incentive environmental regulations stimulate corporate innovation through economic means, thereby significantly promoting GTFP growth. Further analysis indicates that the application of AI technology plays a crucial moderating role, mitigating the negative effects of command-and-control regulations and enhancing the positive effects of market-incentive regulations.

## Keywords

environmental regulation; green total factor productivity; digital economy; artificial intelligence

# 人工智能时代背景下环境规制赋能绿色全要素生产率机理研究

彭丽桦 林星彤 罗秋涵

华南师范大学国际商学院, 中国·广东 佛山 528200

## 摘要

人工智能产业的迅速发展为传统环境规制提供了新的思路。本文基于2012-2024年中国281个地级市的面板数据,考察在人工智能时代背景下,不同类型环境规制对绿色全要素生产率的影响机制。研究发现:命令控制型环境规制会因增加企业合规成本而抑制GTFP提升,而市场激励型环境规制则通过经济手段激发企业创新动力,从而显著促进GTFP增长。进一步分析表明,人工智能技术的应用发挥了重要调节作用,即能够缓解命令控制型规制的负面效应,并增强市场激励型规制的积极效应。

## 关键词

环境规制; 绿色全要素生产率; 数字经济; 人工智能

## 1 引言

党的二十大报告明确提出“推动绿色发展,促进人与自然和谐共生”。在此背景下,绿色全要素生产率作为统筹经济增长与资源环境代价的关键指标,其提升路径备受关注。然而,既有文献多聚焦于环境规制的直接效应,少有研究将人工智能时代背景纳入分析框架,系统考察其在环境规

制与GTFP关系中的调节作用。

综上,本文在考察环境规制影响绿色全要素生产率的研究基础上,着重关注人工智能技术在其中所扮演的角色。研究旨在为理解环境规制与绿色发展的关系提供新的视角。

## 2 理论分析与研究假设

### 2.1 环境规制对绿色全要素生产率影响的理论分析

环境规制对绿色全要素生产率的影响可能因规制工具类型及外部经济环境而异。本文重点探讨命令控制型与市场激励型两类环境规制对GTFP的差异化影响,并引入数字经济这一关键变量,系统分析其产生的调节效应。

命令控制型环境规制通常通过设立强制性技术标准、排放限额或行政许可等方式,直接干预企业的生产决策。尽管其意图明确,但根据“遵循成本”理论,这类规制会迫使

**【基金项目】**2025—2026学年华南师范大学学生课外科研“挑战杯”金种子课题“数字经济背景下环境规制对绿色全要素生产率的影响”(项目编号:25GSKA05)。

**【作者简介】**彭丽桦(2004—),女,本科,中国广东佛山人,从事数字经济研究。

企业将大量资源用于满足合规要求，挤占了本可用于提升生产效率与技术创新活动的投入。同时僵化的标准可能削弱企业进行超越标准之外的绿色探索的积极性，导致“创新补偿”效应不足，进而对 GTFP 的提升构成阻碍<sup>[1]</sup>。

而市场激励型环境规制通过价格信号和市场机制，将环境外部性内化为企业的经营成本，能激励企业通过开发绿色技术、优化工艺流程来降低治污成本甚至获得先动优势<sup>[2]</sup>。企业拥有更大的灵活性和自主权来选择成本最优的减排路径，从而在改善环境绩效的同时实现生产效率和竞争力的提升。基于此，本文提出：

假设 H<sub>1a</sub>：命令控制型环境规制对绿色全要素生产率的提升有负向影响

假设 H<sub>1b</sub>：市场激励型环境规制对绿色全要素生产率的提升有正向影响

## 2.2 人工智能技术在环境规制对绿色全要素生产率影响中的调节作用

数字经济时代下，人工智能的快速发展，正逐步为优化环境规制执行提供了新路径。命令控制型环境规制依赖于政府强制标准与监管，但传统模式下存在信息滞后、监管粗放等问题，易导致企业采取应对性策略，增加遵循成本，拖累生产效率。而 AI 驱动的大数据分析和物联网技术，可实现环境数据的实时采集、传输与验证，降低政府的信息搜集和执行成本。这削弱了企业利用信息盲区进行规避行为的空间，迫使它们从被动合规转向主动创新，从而抑制命令控制型规制对生产率的挤压。与此同时，预测模型将有望帮助政府能动态调整规制政策，避免“一刀切”带来的资源错配。通过分析历史数据，人工智能可识别高污染企业的风险点，实施差异化监管，降低合规企业的额外负担<sup>[3]</sup>。

与此同时，市场激励型环境规制依靠价格信号和市场活力激发企业创新，但其效果取决于市场效率与信息流畅度。人工智能技术通过增强市场机制的精准性和激励效应，将放大其对绿色全要素生产率的正面作用。例如，智能算法能高效整合碎片化的环境市场数据，优化排污权交易体系的定价与匹配。基于供需预测的智能平台可提高排污权交易的实时互动水平，降低交易成本，使减排成本更合理分配。这强化了市场激励的“创新补偿效应”，即企业通过绿色创新获得的收益被放大，激励更高水平的研发投入。基于此，本文提出：

H2：人工智能技术能够缓解命令控制型环境规制的负面影响，并增强市场激励型环境规制的正面影响。

## 3 研究设计

### 3.1 指标选取

被解释变量为绿色全要素生产率（GTFP）。本研究参考史丹等<sup>[3]</sup>的做法，以劳动、资本和能源作为投入要素，将地区生产总值视为合意产出，并将工业二氧化硫、工业烟粉尘及工业废水排放量作为非合意产出，采用 SBM-ML 指数法进行测算<sup>[4]</sup>。

解释变量为环境规制（）。现有研究普遍将环境规制划分为行政命令、经济约束等多种形式，本文选取命令控制型和市场激励型环境规制进行研究。在命令控制型环境规制（）方面，政府工作报告中涉及环境治理的词汇出现频次，可在较大程度上反映该地区政府对环境治理工作的重视程度与政策力度<sup>[4]</sup>。本文参考邵帅（2024）等<sup>[5]</sup>的研究思路，通过 Python 对地方政府工作报告进行文本分词与统计，计算其中与环境相关词汇所在句子的字数占报告总字数的比例，进而构建环境规制强度的测度指标。在市场激励型环境规制方面，本文以排污费入库金额与 GDP 之比表示市场激励型环境规制（）。考虑到市级排污费数据存在较多缺失，且该税费主要针对工业废水排放征收，本研究参照宋鹏等（2022）等<sup>[6]</sup>的处理方法，依据城市工业废水排放量占全省排放量的比重设定权重，通过对省级排污费数据进行加权分配，推算出相应的市级数据。

调节变量为人工智能发展水平（）。AI 企业作为开发和应用人工智能技术的主体，具备良好的参考性。因此，本文选取人工智能企业数量作为衡量指标。此外参考张文卿等<sup>[7]</sup>的研究，选取产业结构（Stru）、研发创新投入强度（Ti）、政府干预（GOV）、对外开放程度（DOF）作为控制变量。

### 3.2 模型构建

为了验证假设 H<sub>1a</sub> 和 H<sub>1b</sub> 中环境规制对绿色全要素生产率的影响，设计模型（1）和（2）如下：

$$GTFP_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Encroll_{it} + \sum City + \sum Year + \sum Controls_{it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

$$GTFP_{it} = \beta_0 + \beta_1 Encroll2_{it} + \sum City + \sum Year + \sum Controls_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中，GTFP 为被解释变量，表示绿色全要素生产率；Encroll1 和 Encroll2 为核心解释变量，分别表示命令控制型环境规制和市场激励型环境规制；Controls 为本文的控制变量，具体为一系列可能影响绿色全要素生产率和宏观特征变量。 $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$ 、 $\beta_0$ 、 $\beta_1$  表示待估参数， $\varepsilon_{it}$  为随机扰动项。

根据假设 H<sub>2</sub>，加入环境规制与人工智能发展水平的交互项，设计实证模型（3）和（4）如下：

$$GTFP_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 Entroll_{it} + \gamma_2 Altech_{it} + \gamma_3 Entroll_{it} \times Altech_{it} + \sum Controls_{it} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$GTFP_{it} = \omega_0 + \omega_1 Entroll2_{it} + \omega_2 Altech_{it} + \omega_3 Entroll2_{it} \times Altech_{it} + \sum Controls_{it} + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

其中 Altech 表示调节变量人工智能发展水平， $\gamma_0$ 、 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\omega_0$ 、 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  表示待估参数， $\varepsilon_{it}$  表示随机扰动项。

## 4 实证结果与分析

对各模型进行估计，结果见下表。第 1、2 列为基准回归模型，其中政府管制型环境规制（Entroll1）和市场激励型环境规制（Entroll2）的系数均在 1% 水平上显著。这表明在控制一系列宏观变量后，政府管制型环境规制对绿色全要素生产率具有抑制作用，而市场激励型环境规制则能显著促进

其提升,假说 H1a 与 H1b 得到验证。在执行环境政策时,企业需要承担额外的经济、人力等成本。政府管制型环境规制通常设定硬性处罚与达标要求,这增加了经营业绩的压力,使企业倾向于满足最低合规标准而非主动推动绿色转型,同时繁琐的规制标准和程序增加了地方政府的信息收集与监管负担,从而影响政策实效<sup>[7]</sup>。相比之下,市场激励型环境规制通过排污征税、许可交易等经济手段,为企业节能减排提供持续激励,引导其主动改进技术、提升效率,从而促进绿色全要素生产率增长。

第 3、4 列考察了没有控制变量时人工智能发展水平的调节效应,第 5、6 列在此基础上纳入了控制变量。实证结果表明,人工智能技术对绿色全要素生产率的影响始终在 1% 的水平上显著为正,为经济绿色可持续发展提供了新路径。具体机制检验结果详见表 1 所示。

交互项的回归结果表明,在命令控制型环境规制中,人工智能技术的应用显著削弱了其对绿色全要素生产率的负面影响;在市场激励型环境规制中,则显著增强了其对 GTFP 的正面影响。以上调节效应的系数均在 1% 的水平上显著,这表明逐渐发展的 AI 技术和产业链更有利于赋能环境规制提升绿色全要素生产率。H2 得到验证。在控制其他变量不变的情况下,人工智能发展水平在命令型环境规制中的调节系数为 0.210,表明随着 AI 技术应用的深化,该类规制对绿色全要素生产率的负面效应得到一定缓解,人工智能技术能够降低企业在命令控制型环境规制下的合规成本与政府的监督执行成本,从而为企业开展绿色创新活动创造更有利的条件。对于市场型环境规制,调节系数是 0.734,表明表明人工智能发展水平越高,该类型环境规制对绿色全要素生产率的提升作用越能得到增强。

表 1 机制检验结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	GTFP	GTFP	GTFP	GTFP	GTFP	GTFP
<i>Entrol1</i>	-0.039***		-0.045***		-0.044***	
	(-3.40)		(-3.86)		(-3.77)	
<i>Entrol2</i>		0.139***		0.193***		0.199***
		(4.24)		(3.85)		(4.06)
<i>Digieco</i>			0.145***	0.087	0.156***	0.097
			(3.36)	(0.92)	(4.45)	(1.02)
<i>Entrol1×Aitech</i>			0.199*		0.210**	
			(2.57)		(2.72)	
<i>Entrol2×Aitech</i>				0.717***		0.734***
				(3.16)		(3.30)
control	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes
固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>N</i>	3535	3535	3535	3535	3535	3535
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.673	0.688	0.676	0.680	0.678	0.682

## 5 结语

本研究基于 2012-2024 年中国地级市面板数据,实证分析了环境规制对绿色全要素生产率的影响,并重点探讨了人工智能技术的调节作用。研究发现,环境规制的效果存在工具异质性。市场激励型环境规制能显著促进 GTFP 提升,主要通过经济信号引导企业绿色创新与资源优化;而命令控制型规制则因较高的合规成本与执行负担,对 GTFP 表现出抑制效应。此外, AI 技术在两者关系中发挥关键调节作用。对于市场激励型规制,人工智能起到“增效器”作用,强化其对绿色创新的诱导效果;对于命令控制型规制,人工智能则扮演“缓冲器”,通过降低合规与监管成本,缓解其负面效应。

综上,在人工智能快速发展的时代背景下,政府、企业、高校应协同推动 AI 技术在绿色创新、政策执行与合规监管中的应用,从而提升环境规制的实施效率,助力绿色可持续发展。

## 参考文献

- [1] 宋美喆,柴江艺.数字经济背景下环境规制对绿色全要素生产率的影响——基于城市面板数据的分析[J].中国流通经济,2023,37(06):14-26.
- [2] Porter M E.America'8 Green Strategy [J].Scientific A-merican, 1991(4):168.
- [3] 史丹,李少林.排污权交易制度与能源利用效率:对地级及以上城市的测度与实证[J].中国工业经济,2020(9):5-23.
- [4] 陈诗一,陈登科.雾霾污染、政府治理与经济高质量发展[J].经济研究,2018,53(2):20-34.
- [5] 邵帅,葛力铭,朱佳玲.人与自然何以和谐共生:地理要素视角的环境规制与环境福利绩效[J].管理世界,2024,40(08):119-146.
- [6] 宋鹏,朱琪,张慧敏.环境规制执行互动与城市群污染治理[J].中国人口·资源与环境,2022(3):49-61.
- [7] 张文卿,董景荣,张海涛,等.环境政策促进中国绿色全要素生产率提升的机制、困境与对策——基于创新模式选择视角[J].经济评论,2023,(01):126-143.