

环境规制对科技创新的影响机制与行业差异研究

——基于大语言模型与计量回归的实证分析

杨若祎 周梓钧 冯士晏

北京物资学院, 中国·北京 101126

摘要: 为实现中国“双碳”目标并推动社会经济全面绿色转型, 探究环境规制与科技创新的协同机制具有关键意义。本项目立足北京市科技创新中心的城市发展定位, 创新性地结合大语言模型文本分析技术与计量经济分析方法, 探讨环境规制对科技创新的影响机制及行业差异。通过构建一套基于政策文本关键词频占比的环境规制强度动态指标, 并整合绿色专利授权量、研发投入等数据形成创新能力评价体系, 建立了面板回归模型以实证检验二者间的非线性关系及行业异质性。结果表明, 环境规制对科技创新存在显著的 U 型影响特征, 且其效应在不同产业与企业间呈现明显差异。在此基础上, 结合问卷调查与实地访谈进行交叉验证, 研究进一步提出了差异化、精准化的政策优化建议, 为北京市协调生态保护与创新活力提供了数据驱动的决策支持, 也为全国其他城市的绿色转型实践提供了可资借鉴的分析范式与实践路径。

关键词: 环境规制; 科技创新; 大语言模型; 计量回归; 行业异质性; 北京市

Research on the Impact Mechanism and Industry Differences of Environmental Regulation on Technological Innovation—Empirical Analysis Based on Large Language Models and Econometric Regression

Yang Ruoyi, Zhou Zijun, Feng Shiyan

Beijing Wuzi University, China Beijing 101126

Abstract: To achieve China's "dual carbon" goals and promote a comprehensive green transformation of the socio-economy, exploring the synergistic mechanisms between environmental regulation and technological innovation holds critical significance. This project, grounded in Beijing's urban development positioning as a hub for technological innovation, innovatively combines large language model-based text analysis with econometric methods to examine the impact mechanisms of environmental regulation on technological innovation and industry-specific differences. By constructing a dynamic environmental regulation intensity indicator based on keyword frequency ratios in policy texts and integrating data such as green patent grants and R&D investments to form an innovation capability evaluation system, a panel regression model was established to empirically test the nonlinear relationship and industry heterogeneity between the two. The results reveal a significant U-shaped impact pattern of environmental regulation on technological innovation, with its effects varying markedly across industries and enterprises. Building on this, the study further proposes differentiated and precision-oriented policy optimization recommendations through cross-verification via questionnaires and field interviews. These findings provide data-driven decision support for Beijing to balance ecological protection and innovation vitality, while also offering a replicable analytical framework and practical pathway for green transformation practices in other cities across the country.

Keywords: Environmental regulation; Technological innovation; Large Language Model (LLM); Metric regression; Industry heterogeneity; Beijing

0 引言

迈克尔·波特 1991 年提出的波特假说指出, 恰当的环境规制能激励企业技术创新, 通过创新补偿效应抵消合规成本, 达成环保与竞争力双赢。随着中国“双碳”目标推

进, 协调环境规制与科技创新成为区域高质量发展关键。北京市作为科创中心, 2025 年发布污染防治行动计划, 提出以生态“含绿量”提升发展“含金量”。2024 年我国绿色低碳技术创新相关发明专利授权量达 5.3 万件, 为 2020 年

两倍。本研究通过分析北京市政府报告环境关键词与企业专利数据，建立回归模型，探究环境规制对企业环境创新的影响，为政策制定提供依据。

1 文献综述与理论基础

1.1 环境规制与技术创新的理论关系

诸多研究表明环境规制与技术创新呈非线性关系。基于 2000–2022 年中国省级面板数据研究发现，命令控制型环境规制与技术创新呈“U 型”关系，市场激励型呈“倒 U 型”关系，公众参与型呈“N 型”关系，这体现了规制强度的门槛效应。

1.2 前人研究综述

当前研究多聚焦环境政策是否实现波特假说。朱锯 (2025) 发现新《环境保护法》实施后，重污染企业短期创新投入减少；赵强 (2015) 指出环境规制对科技创新的影响存在区域异质性，需分区域研究。

1.3 现有研究不足与本研究创新点

现有文献存在规制测度不精确、行业异质性分析不足等局限。本研究创新运用大语言模型解析政策文本构建精准强度指标，结合大数据与机器学习实现数据时空对齐，揭示环境规制对科技创新的非线性影响及行业差异，发现企业所有制结构调节效应，并辅以案例访谈提升实践价值。

2 研究方法

2.1 样本选择和数据收集

本研究整合多源数据，构建北京市 2003–2023 年环境规制与科技创新的综合数据集。数据来源包括：环境规制政策文本：从北京市生态环境局、发改委等部门官网爬取的 215 份环境类政策文件，涵盖大气治理、碳排放管控、生态保护等领域。科技创新指标数据：来自北京知识产权局的专利授权数据（按 IPC 分类筛选绿色专利）、统计局的企业研发投入面板数据（R&D 覆盖度 89%）、中关村技术转化案例库等。

为确保数据质量，本研究进行以下处理：(1) 对政策文本进行去噪清洗，剔除格式标记与非正文内容；(2) 对专利数据按绿色技术分类（WIPO 绿色清单）进行筛选

2.2 数据分析方法

2.2.1 因变量：科技创新水平 (Y)

参考已有研究，采用以下指标衡量科技创新：绿色专利授权量 (Y1)：北京市年度绿色发明专利授权数量，反映绿色技术产出。研发投入强度 (Y2)：全市 R&D 经费支出占 GDP 比重，反映创新投入水平。高新技术产业产值占比 (Y3)：高新技术产业产值占工业总产值比重，反

映创新成果转化。

2.2.2 自变量：环境规制强度 (X)

创新性地采用基于大语言模型 (LLM) 的文本分析方法量化环境规制强度：关键词表制定：利用 LLM (GPT-4 模型) 对政策文本进行语义解析，提取初始关键词表，结合德尔非法专家咨询修正，形成年度环境规制特征词表 (如“碳排放管控”“污染排放标准”等)。强度计算公式：环境规制强度指数 = $\Sigma(\text{关键词频} \times \text{词长}) / \text{政策文本总长度}$ 。

2.2.3 调节变量

为探究行业异质性，引入以下调节变量：行业能耗强度：区分高技术产业与高耗能产业。企业所有制类型：区分国有企业与民营企业。

2.3 模型设定

2.3.1 基准回归模型

为检验环境规制对科技创新的影响，建立以下面板回归模型：
$$Innovation_{i,t} = \alpha + \beta_1 ER_{i,t} + \gamma Controls_{i,t} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{i,t}$$

其中 $Innovation_{i,t}$ 表示地区在 t 年的科技创新水平； $ER_{i,t}$ 表示地区在年的环境规制强度； $Controls_{i,t}$ 表示一系列控制变量，包括经济发展水平、人力资本、外商直接投资等； μ_i 表示个体固定效应，用于控制地区层面的不随时间变化的因素； ν_t 表示时间固定效应，用于控制宏观层面的共同冲击； $\varepsilon_{i,t}$ 表示随机误差项。

2.3.2 门槛效应模型

考虑到环境规制与科技创新可能存在非线性关系，借鉴高新伟与张增杰 (2021) 的研究，建立面板门槛回归模型 (PSTR)：

$$Innovation_{i,t} = \alpha + \beta_1 ER_{i,t} I(ER_{i,t} \leq \pi) + \beta_2 I(ER_{i,t} > \pi) + \gamma Controls_{i,t} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{i,t}$$

i : 地区

t : 时间

π : 门槛值，待估计参数

$I(\cdot)$: 指示函数，满足括号内条件时取值为 1，否则为 0

2.3.3 异质性分析模型

为探究环境规制影响的行业差异，建立分组回归模型：按产业类型分组：高技术产业 vs 高耗能产业。按企业所有制分组：国有企业 vs 民营企业。

$$Innovation_{i,t} = \alpha + \beta_1 ER_{i,t} + \beta_2 (ER_{i,t} \times Industry) + \gamma Controls_{i,t} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{i,t}$$

其中, *Industry* 为行业虚拟变量, 高技术产业取值为 1, 高耗能产业取值为 0。若 β_2 显著, 则表明环境规制对科技创新的影响存在行业差异。

2.4 研究工具

本研究将使用 Stata 计量分析软件进行数据处理和模型估计。

3 实施路径

本研究采用以下三阶段方法量化分析北京市环境规制对科技创新的影响:

3.1 数据获取与变量构造

通过 Python 的 Scrapy 框架结合 Selenium 工具, 定向爬取北京市多源数据库中 2000-2022 年环境政策文本, 经数据清洗后建立结构化量化环境规制强度 (自变量); 同步采用 Requests 库调用北京知识产权局数据接口获取年度专利授权量, 构建科技创新水平 (因变量)。

3.2 模型构建与实证检验

构建计量回归模型考察环境规制强度 (X) 与科技创新水平 (Y) 的关联关系。同时考虑到环境规制的当期与滞后效应。通过替换变量、调整函数形式、滚动回归等进行稳健性检验, 并进一步分组考察规制工具与企业所有权的交互效应。

结果验证与机理深化: 结合问卷调查与深度访谈, 交叉验证计量结果, 识别并解释模型未能捕捉的异质性特征与系统性偏差, 提升研究结论的实践信度。

说明: 表 1 显示, 核心变量 (如环境规制与科技创新) 均有较大的变异范围 (标准差), 满足建模分析的基本需求。

说明: U 型关系验证: 在模型 (1) 中, 环境规制强度

的二次项系数显著为正 (0.021), 这证实了环境规制与科技创新之间存在显著的 U 型关系。滞后效应与分组差异: 模型 (3) 显示环境规制对国有企业创新的促进作用在 5% 水平上显著 (0.318)。模型 (4) 表明命令控制型规制工具在 1% 水平上显著促进创新 (0.402)。稳健性良好: 研发投入强度在多数模型中显著为正, 控制变量作用稳定, 模型拟合优度均高于 0.65, 表明模型设定合理。

4 结语

4.1 主要研究结论

本研究基于北京市 2000-2022 年面板数据, 采用大语言模型与计量经济学方法, 分析了环境规制对科技创新的影响及行业差异, 主要结论如下:

第一, 环境规制与科技创新存在 U 型非线性关系。当环境规制强度低于阈值时, 其创新促进效应不显著甚至为负; 超过阈值后, 创新补偿效应显著增强。这一发现支持“波特假说”, 但强调其有效性取决于规制强度。

第二, 环境规制的影响存在显著行业异质性。高耗能产业的环境规制创新效应 (0.352) 远高于高技术产业 (0.127), 表明污染密集型行业更有动力通过创新应对环境监管压力。企业所有制是重要调节因素。国有企业对环境规制的响应更显著, 表明其在环保技术创新中发挥引领作用。

第三, 环境规制工具的效果差异明显。命令控制型工具对绿色技术创新的促进效应最强, 而市场激励型工具对研发投入的拉动作用更显著。

4.2 政策建议

基于上述结论, 提出以下政策建议:

4.2.1 实施差异化环境规制政策

针对不同行业特征实施精准化调控: 对高耗能产业

表1 描述性统计结果

变量	观测数	均值	标准差	最小值	最大值	说明
科技创新水平	23	5.20	0.86	3.50	6.80	专利授权量的对数值
环境规制强度	23	3.75	1.12	1.80	5.90	政策文本词频量化的对数值
研发投入强度	23	2.10	0.45	1.30	3.00	研发投入占GDP比重 (%)
高技术产业占比	23	24.50	4.80	16.00	35.00	高技术产业产值比重 (%)

表2 计量回归核心结果

变量	模型(1)	模型(2)	模型(3)	模型(4)
环境规制强度	-0.152	0.084	0.318**	0.402***
环境规制强度 ²	0.021*	0.018	-	-
研发投入强度	0.255**	0.241**	0.285**	0.198
常数项	4.125***	4.033***	3.850***	4.210***
观测数	23	22	23	23
R ²	0.72	0.69	0.65	0.75

(如钢铁、化工)实施严格且稳定的排放与技术标准,倒逼其绿色技术创新。参考邯郸市做法,针对钢铁等重点行业制定垂直大模型技术应用方案,推进减污降碳节能增效。对高技术产业则以税收优惠等市场激励工具为主,降低创新成本。

4.2.2 优化环境规制工具组合

根据政策目标设计多元化政策工具箱:综合运用命令控制、市场激励与公众参与型措施,例如设立技术攻关专项、扩大碳市场、完善环境信息披露,以引导社会资本支持绿色创新。

4.2.3 建立动态调整机制

基于 U 型关系特征,构建环境规制强度动态监测与预警系统:运用大模型和 AI 技术监测环境规制强度与创新效应的 U 型关系,设立预警指标,在接近拐点时及时调整政策,提升规制的精准性与适应性。

参考文献:

[1] 李莉莉,肖鸿波,秦海波.生态文明建设、环境规制与绿色技术创新[J].统计与决策,2024(10).

[2] 孙婷等.技术创新、资本深化与制造业国际竞

争力——基于环境规制视角的实证检验[J].财经论丛,2018(01).

[3] 河北省生态环境厅.河北省近期部分工作动态(2025年第7期)[EB/OL].2025.

[4] 高新伟,张增杰.不同环境规制影响技术创新的门槛效应研究——基于 PSTR 模型[J].中国石油大学学报,2021,37(2).

[5] 环境规制约束能倒逼我国产业技术创新吗——基于 Lagrange 函数模型的分析[J].贵州财经大学学报,2019(6).

[6] 刘春兰等.环境规制对中国工业全行业技术创新的影响研究[J].科技管理研究,2014(20).

[7] 台湾教育部.迎向科技浪潮 环境部将成立 AI 司[N].国立教育广播电台,2025-09-25.

[8] Python 网络爬虫在环境保护中的应用:污染源监测数据抓取与分析[EB/OL].2025.

基金项目:本文系北京物资学院“双碳”目标下中国用能权政策对低碳转型发展的影响及其机制研究,项目阶段性成果(编号:054240020102)。