
环境规制与二氧化碳排放

——基于企业减排动机的理论和实证分析

王文娟¹ 梁圣蓉¹ 余群芝²¹

(1. 武汉商学院 经济学院流通经济研究中心, 湖北 武汉 430056;

2. 中南财经政法大学 经济学院, 湖北 武汉 430073)

【摘要】: 通过建立微观企业碳排放模式对环境规制强度的响应模型, 分析企业选择低碳排放生产模式的环境规制强度门槛, 考察减排技术、减排投入、“绿色”产品需求等因素的异质性对该门槛大小的影响, 并选取 2000—2017 年中国省际面板数据对上述关系进行实证分析。研究结果显示环境规制减少了中国二氧化碳排放, 但影响弹性较小, 减排技术水平越低、减排投入比越高、人均收入越高的地区, 环境规制降低二氧化碳排放的作用越不明显。

【关键词】: 环境规制 碳排放 异质性 减排动机

【中图分类号】: F062.2; X196 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)04-013-08

随着全球气候变暖, 冰川加速融化、海平面上升、极端天气频发等问题已经给人类和很多其他物种的生命构成威胁。联合国环境规划署 2019 年度发布的《排放差距报告》指出, 即使当前《巴黎协定》下所有无条件承诺都得以兑现, 到 21 世纪末全球气温仍有可能上升 3.2℃, 将带来更广泛、更具破坏性的气候影响。中国政府在 2009 年哥本哈根世界气候大会上承诺“2020 年单位 GDP 碳排放强度下降 40%~45%”, 2018 年中国科技部发布的《全球生态环境遥感监测年度报告》(以下简称《报告》)中显示中国已提前 3 年兑现该承诺。该《报告》同时指出, 中国仍是碳排放大国, 与发达国家相比仍然存在较大减排压力。党的十九大报告指出, 应“加快建立绿色生产和消费的法律制度和政策导向, 建立健全绿色低碳循环发展的经济体系”。环境规制作为解决企业生产排放负外部性的主要措施, 该措施是否能对经济体系的微观单位——企业层面形成实际影响, 是环境规制最终能否产生减排作用的关键。中国区域经济的发展存在异质性, 各地绿色产业结构、企业绿色技术水平和居民绿色消费理念等方面差异明显, 因此, 对各地区微观企业产生约束作用的环境规制也应有所不同。

环境规制如何通过企业层面发挥减排作用?地区绿色消费和绿色生产的异质性对环境规制的减排效果会产生何种影响?本文从微观企业减排动机角度, 考察环境规制强度大小与其减排作用的关系, 同时分析在企业减排技术、减排投入和“绿色”产品需求异质性等条件下环境规制减排效果的变化。

1 文献综述

作者简介: 王文娟, 博士, 副教授, 研究方向为环境规制、贸易与环境。E-mail:410565831@qq.com

基金项目: 教育部人文社会科学青年基金项目“基于国际技术溢出视角的长江经济带绿色技术创新与政策研究”(20YJCZH084); 武汉商学院博士科研基金项目“基于异质性企业贸易理论的贸易—环境效应分析与政策研究”(2018KB009); 国家社会科学基金项目“国际气候援助的碳减排效应评估及其政策启示研究”(16BJL083)

环境规制能否对全球气候变暖产生积极作用，研究围绕“绿色悖论”展开但结论不一。Sinn^[1]提出“绿色悖论”假说，认为从减少化石燃料需求角度制定环境政策来抑制气候变暖是无效的：资源所有者的不安全产权和全球变暖的外部性扭曲了私人动机，燃料供给价格下降引起其他碳消费者消耗更多的碳，并且预期的价格下降还会加速供给方的开采和储备，从而加速全球变暖。一部分研究支持该假说，认为减排政策增加了能源供应量和累积排放量，该悖论甚至比 Sinn 指出的更为强烈^[2,3]。另一部分研究质疑“绿色悖论”，认为在不断提高的边际开采成本、替代性可再生能源利用和边做边学技术存在的情况下，悖论可能不存在^[4]。另外，VanDerPloeg^[5]则从化石燃料的供给弹性、是否对可再生能源进行补贴、碳税的大小及其增长速度方面，讨论了强“绿色悖论”、弱“绿色悖论”和“绿色悖论”不出现的情况。

关于环境规制与中国碳排放的关系，一些研究发现环境规制严格程度与其作用效果关系密切，但研究结论存在较大差异。张华和魏晓平^[6]认为，环境规制与碳排放总量之间呈倒“U”型曲线关系，而 Hou 等^[7]基于环境规制与碳排放强度关系的研究得到与之近乎相反的结论；还有学者的研究得出环境规制与碳排放绩效间存在倒“U”型关系^[8]、广义“U”型双门槛效应^[9,10]或负相关关系^[11]。部分研究区域异质性角度分析环境规制产生不同效果的原因：Ren 等^[12]发现，基于市场的法规和自愿性法规在中国东部地区对环境效率有正向影响，命令管制性法规和市场性法规在中部地区有正效应，而在西部地区仅有命令管制性法规有效；李巍和郝永勤^[13]认为，环境规制能提升创新—环境的正向相关性，但该提升作用在创新技术最先进和最落后地区均失效；彭星等^[14]

发现，文化非正式制度对碳排放的影响存在经济发展水平和人资本水平门限。亦有研究从企业行为角度关注环境规制的影响，多数围绕“波特假说”^[15]研究企业绿色技术创新对环境规制的反应：合理设置的环境规制能转变技术进步方向^[16,17,18]；环境规制对企业绿色技术创新的促进作用与环境规制强度^[19,20]、行业规模和创新人力资源投入^[21,22]以及企业的技术学习因素^[23]等因素相关；针对企业与政府博弈行为的研究从成本最小化^[24,25]或利润最大化^[26,27]角度考察不同政策下企业的生产运作行为或绿色技术选择行为。

综合上述文献，我们发现基于不同的碳排放表征变量，国内研究者对环境规制的碳排放影响路径及其形成原因和结论均有不同看法；基于企业层面的研究亦多关注企业绿色技术行为选择而未与终端碳排放结果进行联系。鉴于此，本文在前期研究基础上做出以下推进：第一，我们在一般均衡模型中，从企业行为角度考察环境规制强度与逐利企业低碳排放模式生产动机的关系，以及绿色消费和绿色生产的异质性对该关系的影响。第二，以理论分析结论为基础构建面板模型实证研究环境规制—二氧化碳影响弹性；第三，在实证模型中以交叉变量的引入和分地区弹性计算分析企业减排技术和减排投入的异质性、绿色消费市场的异质性对环境规制—碳排放弹性的影响。

2 环境规制与企业排放模式选择理论模型

生产性企业的碳排放技术水平和减排投入存在差异，同时亦面临不同的绿色产品市场环境，因此在遵循成本变化和利润驱动下，企业生产排放模式对环境规制的反应会有所不同，当资本和劳动等生产要素从高碳排放企业向低碳排放企业转移时，碳排放总量下降，反之碳排放总量将上升。本部分我们以 Acemoglu 等^[16]的理论框架为基础，分析环境规制强度与企业碳排放模式选择的关系，并进一步分析绿色消费和绿色生产特征的异质性对上述关系的影响。

2.1 模型假设和推导

假设存在高碳排放和低碳排放两类生产性企业，高碳排放企业不进行任何减排投入，单位产品碳排放量高；低碳排放企业将生产要素的一部分用于碳减排，单位产品的碳排放量较低。两类企业的生产函数均为科布道格拉斯生产函数。高碳排放企业生产函数为 $Y_d = AK_d^\alpha L_d^{1-\alpha}$ ，其中，A 代表生产技术， K_d 和 L_d 分别表示高碳排放企业的资本和劳动力投入， α 和 $1-\alpha$ 表示 K 和 L 的产出弹性。假设高碳排放企业单位产品碳排放量为 Ω_d ，则总碳排放量为 $\Omega_d Y_d$ 。低碳排放企业将生产要素的一部分用于碳减排，减排投入比例为 $1-\theta$ ， $\theta \in (0, 1)$ ， θ 表示企业将生产要素投入到最终产品生产中的比例，其中， θ 不为零的考虑源于通常情况下企业不会采取将全部最终产品投入减排的行动决策， θ 小于 1 表示低碳排放企业减排投入不为零。因此，低碳排放企业最终

产品生产函数为 $Y_c = A(\theta K_c)^\alpha (\theta L_c)^{(1-\alpha)} = \theta Y_c$, 其中 K_c 和 L_c 分别表示低碳排放企业总的资本和劳动力数量。假设低碳排放企业在进行减排投入前单位产品碳排放量为 Ω_c ($\Omega_c \leq \Omega_d$), Ω_c 与企业减排技术水平负相关, $\Omega_c = \Omega_d$ 时表示低碳排放企业在减排前没有比高碳排放企业更先进的减排技术。

我们借鉴 Brock & Taylor^[28]的方法, 推导低碳排放企业的生产排放总量。假设减排投入增加不改变企业当前的减排技术水平, 即单位排放不变; 减排投入的规模报酬不变, 边际报酬递减(沿用 Brock & Taylor^[28]中对污染物排放和减排投入效果的假设)。同时定义, 若企业减排前单位碳排放为 Ω , 当企业投入 Y^d 单位的最终产品进行减排时总的污染物排放将减少 ΩA 个单位。那么, 通过减排后, 企业的最终碳排放 E 可表示为:

$$E = \Omega Y - \Omega A(Y, Y^d) \quad (1)$$

$$E = \Omega Y [1 - A(1, Y^d/Y)] \quad (2)$$

$$E = \Omega Y \alpha (Y^d/Y) \quad (3)$$

$$\alpha(Y^d/Y) = 1 - A(1, Y^d/Y) \quad (4)$$

式(1)和式(2)的计算源于当减排技术不变时减排投入规模报酬不变的假设。式(3)和式(4)中, $\alpha(\cdot)$ 表示在减排技术不变时企业减排投入的效果。基于减排有效性和减排投入边际报酬递减假设, $\alpha(0) = 1$, $\alpha'(\cdot) < 0$, $\alpha''(\cdot) > 0$ 。鉴于 $\alpha(\cdot)$ 的上述特征, 我们令 $\alpha(X^d/X) = (1 - X^d/X)^\gamma = \theta^\gamma$, $\gamma > 1$, 则低碳排放企业的碳排放总量为 $\Omega_c \theta^\gamma A K_c^\alpha L_c^{(1-\alpha)}$ 。

我们以碳排放税大小表示政府环境规制的严格程度, 假设政府对每单位产品征收 τ 单位的碳排放税, 高碳排放企业最终产品(以下简称“肮脏”产品)的价格为 P_d , 资本和劳动力价格分别为 r_d 和 ω_d , 则高碳排放企业的利润为:

$$\pi_d = P_d A K_d^\alpha L_d^{(1-\alpha)} - r_d K_d - \omega_d L_d - \tau \Omega_d A K_d^\alpha L_d^{(1-\alpha)} \quad (5)$$

根据利润最大化的一阶条件, 对式(5)计算 K_d 和 L_d 的偏导数得:

$$r_d = \alpha (P_d - \tau \Omega_d) A K_d^{(\alpha-1)} L_d^{(1-\alpha)} \quad (6)$$

$$\omega_d = (1-\alpha) (P_d - \tau \Omega_d) A K_d^\alpha L_d^{-\alpha} \quad (7)$$

同理, 低碳排放企业的利润为:

$$\pi_c = P_c \theta A K_c^\alpha L_c^{(1-\alpha)} - r_c K_c - \omega_c L_c - \tau \Omega_c \theta^\gamma A K_c^\alpha L_c^{(1-\alpha)} \quad (8)$$

式中: P_c 为低碳排放企业最终产品(以下简称“绿色”产品)的价格, r_c 和 ω_c 分别是低碳排放企业资本和劳动力价格。根据利润最大化的一阶条件, 对式(8)计算 K_c 和 L_c 的偏导数得:

$$r_c = \alpha (P_c \theta - \tau \Omega_c \theta^\gamma) A K_c^{\alpha-1} L_c^{1-\alpha} \quad (9)$$

$$\omega_c = (1-\alpha) (P_c \theta - \tau \Omega_c \theta^\gamma) A K_c^\alpha L_c^{-\alpha} \quad (10)$$

通过式(6)、式(7)、式(9)、式(10)计算两类企业资本价格和劳动力价格之比为:

$$\frac{r_c}{r_d} = \frac{(\theta - \tau\Omega_c\theta^\gamma)K_c^{\alpha-1}L_c^{1-\alpha}}{(P_d - \tau\Omega_d)K_d^{\alpha-1}L_d^{1-\alpha}} \quad (11)$$

$$\frac{\omega_c}{\omega_d} = \frac{(P_c\theta - \tau\Omega_c\theta^\gamma)K_c^\alpha L_c^{-\alpha}}{(P_d - \tau\Omega_d)K_d^\alpha L_d^{-\alpha}} \quad (12)$$

假设资本劳动比在两类企业相等, 即 $K_c/L_c=K_d/L_d$, 则由式(11)、式(12)我们有:

$$\frac{r_c}{r_d} = \frac{\omega_c}{\omega_d} = \frac{P_c\theta - \tau\Omega_c\theta^\gamma}{P_d - \tau\Omega_d} \quad (13)$$

当 $r_c/r_d = \omega_c/\omega_d > 1$ 时, 生产要素从高碳排放企业向低碳排放企业流动, 由 $\frac{P_c\theta - \tau\Omega_c\theta^\gamma}{P_d - \tau\Omega_d} > 1$ 得:

$$\tau > \frac{P_d - P_c\theta}{\Omega_d - \Omega_c\theta^\gamma} \quad (14)$$

2.2 模型推论

式(14)表明, 当政府征收的碳排放税额超过一定水平时, 生产要素从高碳排放企业向低碳排放企业转移, 生产型企业的总体生产模式由高碳排放转向低碳排放。下面我们对式(14)进行讨论并得出如下推论:

推论 1: 当“绿色”产品的相对价格高于一定值时, 在非负碳排放税下, 企业会自主选择低碳排放生产模式。由 $\Omega_c \leq \Omega_d$ 、 $\gamma > 1$ 、 $\theta \in (0, 1)$, 得 $\Omega_d - \Omega_c\theta^\gamma > 0$, 则当 $P_d < P_c\theta$ 时, 非负碳排放税使式(14)恒成立。这种情形表示当“绿色”产品相对于“肮脏”产品的价格高于一定值时(即 $P_c/P_d > 1/\theta$ 时), 在逐利目的下, 企业即使面临零排放税条件亦会转向低碳排放生产模式。我们考虑上述情形存在的两种现实情况: 一是消费者收入水平和环境偏好均较高, 消费者对“绿色”产品的需求相对较高, 并愿意为“绿色”产品支付更高的价格; 二是政府对低碳排放生产的高价“绿色”产品进行补贴, 即政府对企业生产排放的外部性解决方案从征税转移到补贴。

推论 2: 当“绿色”产品的相对价格低于一定值时, 要使企业转向低碳排放生产模式, 政府收取的碳排放税须高于一定数额。该数额的最低值与“肮脏”产品价格、低碳排放企业碳排放强度和减排投入比例成正比, 与“绿色”产品价格、高碳排放企业碳排放强度成反比。

当 $P_d - P_c\theta \geq 0$ 时, 即 $P_c/P_d \leq 1/\theta$ 时, 式(14)表示存在 $\tau_{\min} = \frac{P_d - P_c\theta}{\Omega_d - \Omega_c\theta^\gamma}$, 当 $\tau > \tau_{\min}$ 时, 生产要素从高碳排放企业流入低碳排放企业, 企业的总体生产模式从高碳排放转向低碳排放。如前文所述, 当消费者环境意识缺乏, 对“绿色”产品支付意愿不足, 同时无可得政府补贴时, 企业难以自主形成低碳排放模式行为, 碳排放税是生产要素流向低碳排放企业的外在激励。

我们对 τ_{\min} 分别计算 P_d 、 P_c 、 Ω_d 、 Ω_c 和 θ 的偏导数，可得该最低碳税值与上述各变量之间的关系。由 $\partial\tau_{\min}/\partial P_d > 0$ 、 $\partial\tau_{\min}/\partial P_c < 0$ 得，在其他条件不变时，企业转向低碳生产模式所需最低碳税值随着“肮脏”产品的价格上升而增加，随着“绿色”产品价格的上升而减小。当 $P_c/P_d \leq 1/\theta$ 时，碳排放税是企业形成低碳模式生产动机的必要外在激励。消费者环保意识越缺乏，对“肮脏”产品的支付意愿越高，该激励所需的最低碳税门槛越高；反之，随着环境意识的提升，消费者对“绿色”产品的消费偏好越高，从而“绿色”产品价格越高，企业进行低碳生产所需的最低碳税值越低。

$\partial\tau_{\min}/\partial\Omega_d < 0$ 、 $\partial\tau_{\min}/\partial\Omega_c > 0$ 表示，在其他条件不变时，高碳排放模式时单位碳排放 Ω_d 越低，或低碳排放模式时单位碳排放 Ω_c 越高，企业形成低碳排放模式生产动机的最低碳税值越高。与企业低碳技术直接相关的碳排放强度影响企业是否进行低碳模式生产的决策。高碳排放模式下碳排放强度 Ω_d 越低，与低碳排放模式碳排放强度差距越小，政府需实施更高的碳排放税，才能从成本角度补偿低碳排放企业的减排措施，从而使高碳排放企业从成本遵循角度转向低碳排放模式。反之，若低碳排放模式下碳排放强度 Ω_c 越低，与高碳排放模式下碳排放强度 Ω_d 差距越大，低碳排放企业的减排措施使碳排放强度降低幅度越大，从而激励企业采取减排措施转向低碳排放模式的最低碳税值越小。

$$\partial\tau_{\min}/\partial\theta = \frac{P_c\Omega_c\theta^\gamma - P_c\Omega_d - \gamma P_c\Omega_c\theta^{\gamma-1} + \gamma P_d\Omega_c\theta^{\gamma-1}}{(\Omega_d - \Omega_c\theta^\gamma)^2},$$

令 $\Psi(\theta) = P_c\Omega_c\theta^\gamma - P_c\Omega_d - \gamma P_c\Omega_c\theta^{\gamma-1} + \gamma P_d\Omega_c\theta^{\gamma-1}$ ，则 $\Psi'(\theta) = \gamma(1-\gamma)\Omega_c\theta^{\gamma-2}(P_d - P_c\theta)$ 。当 $\theta < P_d/P_c$ 时， $\Psi'(\theta) > 0$ ；当 $\theta = P_d/P_c$ 时， $\Psi'(\theta) = 0$ 同时 $\Psi(\theta) < 0$ 。因此，当 $\theta < P_d/P_c$ 时， $\Psi(\theta) < 0$ ，从而 $\partial\tau_{\min}/\partial\theta < 0$ 。这意味着，当低碳排放企业的减排投入比例 $1-\theta$ 增加 (θ 减小) 时， τ_{\min} 变大，即激励企业转向低碳排放模式的最低碳排放税须提高。减排投入比例增加使低碳排放企业生产成本提高，碳排放税须位于更高水平才能补偿其成本支出增量，使高碳排放企业资源流向低碳排放企业变得有利可图，从而企业从高排模式转向低碳排放模式。

综上，我们对理论模型部分小结如下：当“绿色”产品相对价格较高时，生产要素会从高碳排放企业自主流向低碳排放企业，生产性企业在零排放税情况下即可实现低碳排放转型；当“绿色”产品相对价格较低时，存在一个碳排放税临界值，当实际碳排放税高于该临界值时，生产性企业由高碳排放模式转向低碳排放模式，该碳排放税临界值的大小与高碳排放和低碳排放模式下的碳排放强度、低碳排放企业的减排投入比例、“绿色”产品和“肮脏”产品的相对价格有关。

3 实证分析

我们选取中国 2000—2017 年 29 个省、自治区、直辖市的数据 (由于数据缺失，截面样本中不包括西藏自治区、重庆市以及港澳台地区)，考察环境规制与二氧化碳排放的关系，同时分析各地减排技术水平、减排投入比例和“绿色”产品相对价格等特征的异质性对上述关系的影响。数据来源包括历年《中国统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国能源统计年鉴》等。为剔除物价因素，本文中涉及价格指数的指标均以 2000 年的价格水平为基期进行平减。

3.1 模型和变量说明

3.1.1 模型说明

基于前文理论分析，我们的实证研究模型如下：

$$CO_{2it} = \beta_0 + \beta_1 GDPS_{it} + \beta_2 AGDP_{it} + \beta_3 AGDP_{it}^2 + \beta_4 INDUS_{it} + \beta_5 \phi_{it} ER_{it} + \beta_6 RD_{it} + \beta_7 PATENT_{it} + \beta_8 PATENT_{it-1} + \beta_9 FDI_{it} + \mu_{it} \quad (15)$$

$$\phi_{it} = \varphi_0 + \varphi_1 P_{it} + \varphi_2 RD_{it} + \varphi_3 PATENT_{it} + \varphi_4 IPATENT_{it-1} \quad (16)$$

式中：i 和 t 分别代表省份和年度， ER_{it} 表示环境规制， P_{it} 、 RD_{it} 、 $PATENT_{it}$ 、 $PATENT_{it-1}$ 分别代表污染物价格水平、企业减排投入比、当前减排技术水平和往期减排技术水平。考虑到绿色产品相对价格数据难以获取，我们将其以消费者购买能力和环境偏好相关的人均收入水平 $AGDP_{it}$ 代替，同时在模型中加入 $AGDP_{it}$ 的平方项以考察人均收入水平对二氧化碳排放可能产生的非线性影响。 $GDPS_{it}$ 、 $INDUS_{it}$ 、 FDI_{it} 分别代表宏观经济变量单位面积 GDP、第二产业占比、外商直接投资占比。用 $\beta_5 \phi_{it}$ 度量环境规制对二氧化碳排放的总影响系数，其中 $\beta_5 \phi_0$ 表示不存在其他异质性因素时，环境规制对二氧化碳排放的影响； $\beta_5 \phi_1$ 、 $\beta_5 \phi_2$ 、 $\beta_5 \phi_3$ 、 $\beta_5 \phi_4$ 分别表示人均收入水平、企业减排投入比、当前减排技术和往期减排技术等异质性因素存在时，环境规制对二氧化碳排放的影响系数。

3.1.2 变量说明

(1) 二氧化碳排放量。

参照联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的方法，我们以化石能源燃烧和水泥生产过程 [水泥主要由石灰石高温煅烧而形成，石灰石的主要成分是碳酸钙 ($CaCO_3$)，碳酸钙在燃烧过程中释放二氧化碳。我国是水泥生产大国，因此这里将制造水泥时排放的二氧化碳计算在内。另外，为避免重复计算，这里我们只计算化学反应时形成的二氧化碳，没有计算生产水泥过程中燃烧化石燃料而形成的二氧化碳] 中排放的二氧化碳之和来界定各地区的排放量。其中，化石能源燃烧过程中二氧化碳排放的计算公式为：

$$CO_2 = \sum_{i=1}^7 CO_{2i} = \sum_{i=1}^7 E_i \times CF_i \times CC_i \times COF_i \times 3.67 \quad (17)$$

式中：i 表示化石能源种类，包括煤炭、焦炭、汽油、柴油、燃料油和天然气共计 7 种； E_i 表示第 i 种化石能源的消耗量； CF_i 表示发热值； CC_i 表示碳含量； COF_i 表示氧化因子；3.67 是二氧化碳和碳两个化学物质的分子量比值。其中， $CF_i \times CC_i \times COF_i$ 的乘积表示第 i 种能源的碳排放系数，我们参考 IPCC 《国家温室气体排放清单指南 (2006)》中的相关数据，对以上化石能源的碳排放系数分别取值为：煤炭 0.7599、焦炭 0.8550、汽油 0.5538、柴油 0.5921、燃料油 0.6185 和天然气 0.4483。

水泥生产过程中产生的二氧化碳计算公式为： $CO_{2c} = Q_{c} \times EF$ 。其中 Q 表示水泥的生产量，EF 表示水泥生产的二氧化碳排放系数，参考杜立民^[29]的研究，该系数取值为 0.527，单位为吨 CO_2 /吨水泥产量。

(2) 环境规制。

我们借鉴沈能和刘凤朝^[30]的方法，从规制实施成本角度设计环境规制强度变量 ER_{it} ， $ER_{it} = R_{it} / S_{it}$ ，其中， R_{it} 表示第 i 省第 t 年工业污染治理完成额占相应工业增加值的比重， S_{it} 表示第 i 省第 t 年工业增加值占 GDP 的比重。 ER_{it} 的值越大，表示环境规制的强度越大。从成本角度测度环境规制的常规做法是计算污染治理完成额占工业增加值的比重 (仅以 R_{it} 表示环境规制强度)，考虑到各地工业产业结构的异质性，沈能和刘凤朝^[30]的方法是对上述常规做法进行修正。另外，鉴于二氧化碳排放和二氧化硫排放同

根同源，我们在计量过程中将同时考察工业污染治理完成额和工业废气治理(工业废气治理内容包括工业粉尘去除、工业烟尘去除和工业二氧化碳去除)完成额这两个指标对应的 ER_{it} ，对应变量分别以 ER_P_{it} 和 ER_G_{it} 表示。

(3) 其他变量。

企业减排投入比 RD_{it} 以大中型企业研发投入占主营业务收入比例 RD_M_{it} 测度，同时以大中型企业研发投入占新产品销售收入比 RD_N_{it} 作为参考替代变量；企业减排技术水平 $PATENT_{it}$ 以各地发明专利授权数量 $PATENT_G_{it}$ 表示，同时以各地发明专利申请数量 $PATENT_A_{it}$ 作为参考替代变量；经济规模以单位面积内的国内生产总值 $GDPS_{it}$ 表示；产业结构 $INDUS_{it}$ 以第二产业在 GDP 中的占比表示； FDI_{it} 表示外商直接投资占 GDP 的比重。各变量描述性统计见表 1。

3.2 实证研究结果

基于统计显著性我们对替代变量进行取舍，最终采用模型 I 的固定效应回归作为最终拟合结果。模型 I 中，以工业废气治理完成额对应的 ER_G_{it} 作为环境规制的代理变量，以研发投入占主营业务收入比例 RD_M_{it} 度量企业减排投入比，以发明专利的获批数量 $PATENT_G_{it}$ 度量企业减排技术水平。模型选择过程中代表性结果如表 2 所示。

3.2.1 宏观经济变量与二氧化碳排放

经济规模、第二产业增加值占比的增加与二氧化碳排放正相关；人均 GDP 对二氧化碳排放的影响呈现倒“U”型环境库兹涅茨曲线(environment Kuznets curve, EKC)特征；外商直接投资对二氧化碳排放的影响不显著。每平方千米面积内 GDP 每增加 1 亿元，二氧化碳排放将增加约 0.65 万吨；第二产业增加值占比提高 1%，二氧化碳排放增加约 186.94 万吨；人均 GDP 的一次项系数为正，二次项系数为负(与环境规制 ER 的交互项系数为正的在后文讨论)，表明随着人均收入水平的提高，二氧化碳排放量呈现出先增加后下降的倒“U”型 EKC 特征。模型显示，该倒“U”型曲线的拐点出现在人均收入等于 57500 元附近。2000—2017 年，29 个省份的样本数据中，人均 GDP 的均值约为 23204 元，最小值仅为 2662 元，2017 年仅有上海(121141 元)、天津(93010 元)、江苏(68460 元)、北京(67689 元)、福建(62986 元)、浙江(62047 元)、广东(57915 元)(数据均来源于《中国统计年鉴》，并以 2000 年价格水平为基期进行平减)等地的人均收入超过上述拐点值，70%以上的地区人均收入水平低于拐点值。这说明，在过去的近 20 年内，中国绝大多数地区人均收入水平与二氧化碳排放的关系仍处于 EKC 曲线拐点左侧，人均收入水平的提高增加了二氧化碳的排放。

表 1 变量经济含义和统计性描述

变量类型	符号	经济含义	单位	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	CO ₂	二氧化碳排放量	万吨	12744.61	9909.08	167.94	46879.22
解释变量	GDPS	单位土地面积内 GDP 产值	亿元/km ²	1611.52	4166.38	3.66	35964.95
	AGDP	人均 GDP	元	23204.10	18632.49	2662.00	121141.30
	INDUS	第二产业占 GDP 比重	%	45.38	7.99	19.01	59.05
	ER_G	(工业废气治理完成额/工业产值)/(工业产值/GDP)	%	0.57	0.56	0.013	43.6
	ER_P	(工业污染治理完成额/工业产值)/(工业产值/GDP)	%	0.46	0.37	0.036	2.80

	RD_M	企业研发投入占主营业务收入比重	%	0.71	0.29	0.05	1.96
	RD_N	企业研发投入占新产品销售收入比重	%	8.18	8.56	0.36	108.02
	PATENT_G	发明专利获批数量	个	3192.79	6637.59	6.00	46091.00
	PATENT_A	发明专利申请数量	个	13142.50	26318.48	36.00	187005.00
	FDI	外商直接投资占GDP比重	%	2.34	1.92	0.04	10.51

3.2.2 环境规制、绿色生产和绿色消费的区域异质性与二氧化碳排放

表2 模型回归结果

解释变量	模型 I		模型 II		模型 III		模型 IV	
	固定效应	随机效应	固定效应	随机效应	固定效应	随机效应	固定效应	随机效应
GDPS	0.6496***	0.4365***	0.5449***	0.3331*	0.6265***	0.3534**	0.6599***	0.4383***
AGDP	0.6932***	0.6616***	0.6722***	0.6408***	0.6813***	0.6416**	0.6768***	0.6421***
AGDP ²	-6.03E-06***	-5.49E-06***	-5.93E-06***	-5.41E-06***	-5.98E-06***	-5.30E-06***	-6.01E-06***	-5.44E-06***
INDUS	186.9360**	209.1162***	181.5526***	203.1711***	200.5352***	230.0342***	204.1522***	227.9097***
ER_G	-2752.849***	-2662.941***			-1028.915*	-1119.102**	-2129.736***	-1997.799***
ER_P			-1051.827**	-1071.452**				
RD_M	-2506.306***	-2437.644***	-1213.507	-1196.584			-2157.463**	-2038.759**
RD_N					-28.8173	-32.4844		
PATENT_A							0.0246	0.0384
PATENT_G	0.3079*	0.3221*	0.4147**	0.4180**	0.2573	0.2806		
PATENT_A(-1)							0.0238	0.0091
PATENT_G(-1)	-0.1862	-0.1942	-0.3137	-0.3074	-0.1610	-0.1755		
ER_G • AGDP	0.0628***	0.0666***			0.0795***	0.0830***	0.0552***	0.0587***
ER_P •			0.0640***	0.0668***				

AGDP								
ER_G • RD_M	3395.266***	3129.015***					2609.626**	2273.945*
ER_G • RD_N					-13.4489	-9.6094		
ER_P • RD_M			327.9318	257.0819				
ER_G • PATENT_A							-0.0343	-0.0559
ER_G • PATENT_G	-0.6834*	-0.6879*			-0.5675	-0.5866		
ER_P • PATENT_G			-0.5974**	-0.5817**				
ER_G • PATENT_A(-1)							-0.0184	0.0123
ER_G • PATENT_G(-1)	0.5090	0.5236			0.4282	0.4593		
ER_P • PATENT_G(-1)			0.5151	0.5008				
FDI	2.4334	-76.1776	-4.1072	-87.8076	-42.3505	-150.6471	-2.5779	-87.2720
C	-6360.364***	-6650.697***	-6389.904***	-6589.325***	-7941.647***	-8277.752***	-7163.507***	-7498.430***
ER 弹性	-0.0473%***	-0.0483%***	-0.0448%	-0.0432%	-0.0492%	-0.0509%	0.0249%	0.0111%
AGDP 弹性	1.07%***	1.04%***	1.03%***	0.99%***	1.07%***	1.03%***	1.04%***	1.00%***
RD 弹性	-0.0324%***	-0.0370%***	-0.0594%	-0.0601%	-0.0023%	-0.0243%	-0.0378%***	-0.0418%*
PATENT 弹性	-0.0200%***	-0.0171%***	-0.0350%**	-0.0377%**	-0.0162%	-0.0131%	0.0052%	0.0069%
R ²	0.9248	0.7091	0.9256	0.7116	0.9242	0.7010	0.9248	0.7095
调整后的 R ²	0.9179	0.7012	0.9188	0.7038	0.9173	0.6929	0.9180	0.7016
F 检验	135.1949***	89.8368***	136.8912***	90.9514***	134.1567***	86.3918***	135.3780	89.9963
Huasmann 检验		29.8671***		32.0072***		44.4796***		30.4507***

注：上角标*、**、***分别表示变量系数通过 5%、10%、15%的统计性显著检验。限于篇幅，表格中未列出标准误，如有需要可与作者联系。

环境规制对二氧化碳排放的总影响弹性为负(各变量对二氧化碳排放的影响弹性根据均值法计算得出),即总体上看,环境规制对二氧化碳排放的约束作用是存在的;类似地,以研发比例度量的企业减排投入比,和以发明专利授权数量衡量的企业当期技术水平,对二氧化碳排放影响弹性均为负,表明总体上看,研发投入增加和企业技术发明均有利于减少二氧化碳排放。从弹性的具体数值上来看,环境规制度强度、企业研发投入占主营业务收入比例、企业发明专利获批数量每增加 1%,分别使二氧化碳排放量减少 0.04%、0.03%和 0.02%。环境规制、企业减排投入和当前减排技术水平都对二氧化碳排放产生了抑制作用,但是影响程度均较小。企业往期技术水平的影响系数不显著(限于篇幅,文中仅显示滞后一期的企业减排技术对二氧化碳排放的影响,我们以滞后二期和三期的减排技术亦进行了替代分析,系数均不显著)。

环境规制与人均收入交互项系数为正且显著,在人均收入更高的地区,环境规制的减排效果减弱。由前文的实证分析中我们已知,人均收入与二氧化碳排放之间存在倒“U”型 EKC 特征,但当前 70%以上地区的人均收入低于拐点水平,即与人均收入增加相伴产生的环境意识和相应的需求行为变化还未达到拐点门槛^[30],从而在相对较高的“肮脏”产品需求水平下,需更严格的环境规制方能使企业产生减排动机。因此,一方面,人均收入增加没有产生足够的消费者环境意识,另一方面,缺乏环境意识的收入增加形成更高的污染品需求,同时由于缺乏更严格的环境规制,使得随着人均收入水平的上升,环境规制的减排效果逐渐减弱。

图 1 分别显示在不同的人均收入、研发投入比和发明专利授权数量特征(人均收入、研发投入比和发明专利授权数量特征均以各地区历年均值显示)下,各地区环境规制对二氧化碳排放的影响弹性。图 1 显示,各地区人均收入水平大多处于 0~40000 元区间,位于 EKC 曲线拐点左侧;人均收入在 20000~40000 元间地区的环境规制弹性,明显高于人均收入在 0~20000 元的地区,即在 EKC 拐点左侧,环境规制减少二氧化碳排放的作用随着人均收入的提高存在减弱趋势。

环境规制与企业研发投入比的交互项系数为正,且通过 5%统计显著性检验。鉴于环境规制变量的负系数,环境规制与研发投入比交互项的正系数意味着,随着研发投入比的提高,环境规制降低二氧化碳排放的作用被弱化。图 1 中,在研发投入比更高的地区,环境规制对二氧化碳排放负的影响弹性亦逐渐减弱。随着减排投入比例的提高,需要有更严格的环境规制才能使企业在逐利动机下选择低碳排放生产模式,从而使碳排放总量下降。以研发投入比代表减排投入比例的数据结果表明,研发投入比较高地区的环境规制强度供给相对不足,环境规制的减排效果在研发投入比较高的地区更弱。

环境规制与企业发明专利授权数量的交互系数为负,即随着发明专利授权数量的增加,环境规制对二氧化碳排放的约束作用增强。在当前减排技术水平较低(碳排放强度较高)时,需更严格的环境规制才能使企业的低碳生产有利可图,从而形成减排意愿。从图 1 可以看出,在专利授权数量较低的地区,环境规制对二氧化碳的影响弹性在零值上下波动;在专利授权数量相对较高的地区,环境规制对二氧化碳排放的影响弹性全部为负。这说明,在技术水平较低的地区,环境规制强度未能使企业形成低碳排放模式生产意愿,从而未产生明显的环境规制减排效果;当专利授权数量代表的技术水平逐步提高时,企业生产模式由高碳排放转向低碳排放,从而环境规制的减排效果开始显现。

4 结论和政策建议

我们在一般均衡框架内分析微观企业碳排放模式对环境规制强度的响应,以及减排技术、减排投入和绿色产品相对价格等异质性因素对该响应的影响机制,并以 2000—2017 年中国 29 个省份的数据对上述关系进行实证建议。结论和政策建议如下:

(1) 企业的碳减排意愿受环境规制严格程度的影响,在其他条件不变时,环境规制强度越高,企业碳减排意愿越强烈。实证结果显示,中国近 20 年来的环境规制水平起到了降低二氧化碳排放的作用,但作用效果较弱。环境规制作为解决企业生产碳排放外部性的主要措施,规制强度的相对大小直接影响措施实施效果。在利润最大化目标下,相对较弱的环境规制不足以使企业产生低碳排放生产动机。提升环境规制强度,同时保证规制政策有效落实,能促使更多的企业在成本压力下形成减排意愿,转向清洁生产。在环境规制具体工具的运用上,碳排放权交易、碳排放税收等市场性措施更能对企业的减排行为和相应的技术创新提供

激励，有利于环境规制效果的体现。

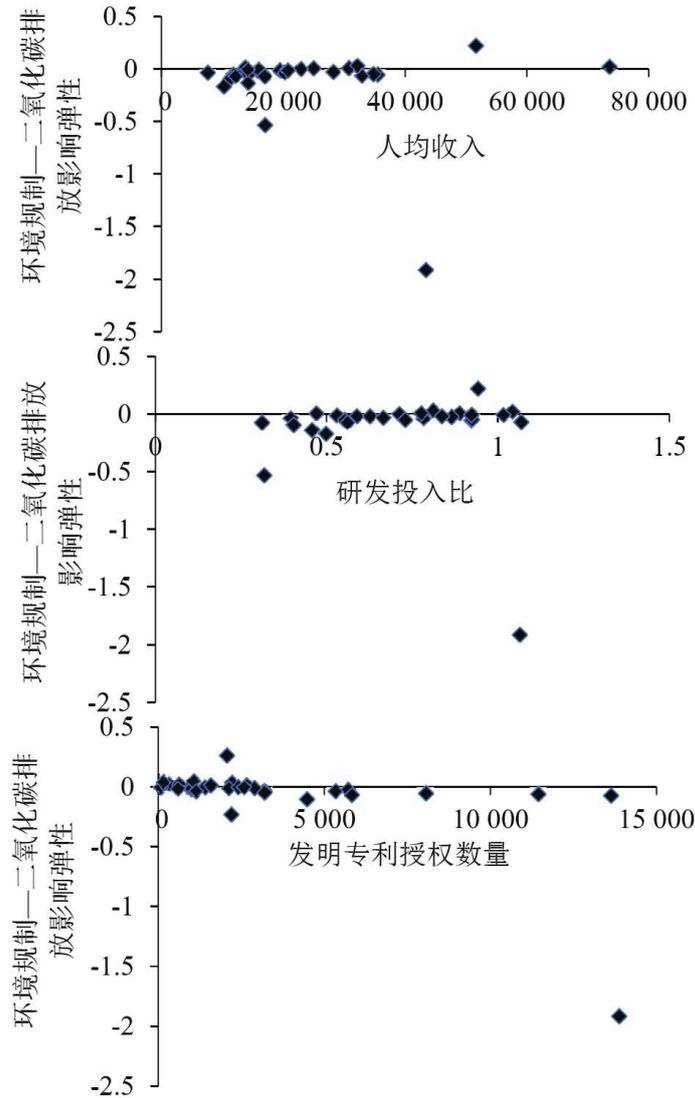


图1 人均收入、研发投入比和发明专利授权数量与环境规制—二氧化碳排放影响弹性

(2) 企业碳减排技术水平越低、减排投入比例越高，或绿色消费需求不足时，企业产生碳减排动机所需的环境规制强度门槛越高。实证结果显示，在碳减排技术较低的地区，环境规制不能产生减排效果；减排投入更高的区域，环境规制影响二氧化碳排放的弹性相对较弱；在人均收入水平达到拐点之前，“绿色”产品需求和价格相对较低，环境规制对二氧化碳排放的影响弹性较弱。因此，环境规制的严格程度应根据地方减排技术和投入以及消费者对“绿色”产品消费需求的异质性而形成相应变化。在减排技术水平较低、减排投入比例相对较高的地区，环境规制强度应适当提高；在收入水平较高，但消费者环境意识薄弱，缺乏“绿色”消费需求的地区，也应采取强度更高的环境规制。同时，提高清洁生产技术研发补贴，奖励绿色创新技术发明，加强低碳技术交流合作，以技术提升带动减排投入的减排绩效，是从绿色生产角度提升环境规制减排效果的有效途径；在收入水平逐步提高的背景下，加强环境保护宣传教育，提高消费者环境意识，引导其绿色消费，将对环境规制的实施效果起到重要辅助作用。

参考文献:

-
- [1]Sinn H W.Public policies against global warming:A supply side approach[J].International Tax and Public Finance,2008,15(4):360-394.
- [2]Gerlagh R,Heijmans R J R K,Rosendahl K E.Endogenous emission caps always induce a green Paradox[R].Munich:CESifo Working Paper No.7862,2019.
- [3]Gronwald M, Van Long N,Röepke L.Simultaneous supplies of dirty energy and capacity constrained clean energy:Is there a green Paradox?[J].Environmental and Resource Economics,2017,68(1):47-64.
- [4]Nachtigall D,Rübelke D.The Green Paradox and learning-by-doing in the renewable energy sector[J].Resource and Energy Economics,2016,43:74-92.
- [5]van der Ploeg F.Second-best carbon taxation in the global economy:The green Paradox and carbon leakage revisited[J].Journal of Environmental Economics and Management,2016,78:85-105.
- [6]张华,魏晓平.绿色悖论抑或倒逼减排——环境规制对碳排放影响的双重效应[J].中国人口·资源与环境,2014(9):21-29.
- [7]Hou J,Teo T S H,Zhou F L,et al.Does industrial green transformation successfully facilitate a decrease in carbon intensity in China?An environmental regulation perspective[J].Journal of Cleaner Production,2018,184:1060-1071.
- [8]张华.环境规制提升了碳排放绩效吗?——空间溢出视角下的解答[J].经济管理,2014(12):166-175.
- [9]路正南,冯阳.环境规制对碳绩效影响的门槛效应分析[J].工业技术经济,2016(8):31-37.
- [10]蓝虹,王柳元.绿色发展下的区域碳排放绩效及环境规制的门槛效应研究——基于SE-SBM与双门槛面板模型[J].软科学,2019(8):73-77,97.
- [11]雷明,虞晓雯.地方财政支出、环境规制与我国低碳经济转型[J].经济科学,2013(5):47-61.
- [12]Ren S G,Li X L,Yuan B L,et al.The effects of three types of environmental regulation on eco-efficiency:A cross-region analysis in China[J].Journal of Cleaner Production,2018,173:245-255.
- [13]李巍,郗永勤.创新驱动低碳发展了吗?——基础异质和环境规制双重视角下的实证研究[J].科学学与科学技术管理,2017(5):14-26.
- [14]彭星,李斌,金培振.文化非正式制度有利于经济低碳转型吗?——地方政府竞争视角下的门限回归分析[J].财经研究,2013(7):110-121.
- [15]Porter M E,van der Linde C.Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship[J].Journal of Economic Perspectives,1995,9(4):97-118.

-
- [16]Acemoglu D, Aghion P, Bursztyn L, et al. The environment and directed technical change[J]. *American Economic Review* 2012, 102(1):131-166.
- [17]Lemoine D. Innovation-led transitions in energy supply[R]. Cambridge: NBER Working Paper No. 23420, 2017.
- [18]Hart R. To everything there is a season: Carbon pricing, research subsidies, and the transition to fossil-free energy[J]. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 2019, 6(2):135-175.
- [19]Marino M, Parrotta P, Valletta G. Electricity (de)regulation and innovation[J]. *Research Policy*, 2019, 48(3):748-758.
- [20]林春艳, 宫晓惠, 孔凡超. 环境规制与绿色技术进步: 促进还是抑制——基于空间效应视角[J]. *宏观经济研究*, 2019(11):131-142.
- [21]李婉红, 毕克新, 孙冰. 环境规制强度对污染密集行业绿色技术创新的影响研究——基于 2003—2010 年面板数据的实证研究[J]. *研究与发展管理*, 2013(6):72-81.
- [22]江珂, 卢现祥. 环境规制与技术创新——基于中国 1997—2007 年省际面板数据的分析[J]. *科研管理*, 2011(7):60-66.
- [23]李娅楠, 林军, 钱艳俊. 环境规制下企业绿色生产决策及技术学习因素影响研究[J]. *管理学报*, 2019(5):721-727.
- [24]Hua G W, Cheng T C E, Wang S Y. Managing carbon footprints in inventory management[J]. *International Journal of Production Economics*, 2011, 132(2):178-185.
- [25]Chen X, Benjaafar S, Elomri A. The carbon-constrained EOQ[J]. *Operations Research Letters*, 2013, 41(2):172-179.
- [26]罗谦, 徐贤浩, 柏庆国. 碳排放约束下政府与企业的 Stackelberg 决策分析[J]. *运筹与管理*, 2017(2):42-48.
- [27]Subramanian R, Gupta S, Talbot B. Compliance strategies under permits for emissions[J]. *Production and Operations Management*, 2007, 16(6):763-779.
- [28]Brock W A, Taylor M S. The green solow model[J]. *Journal of Economic Growth*, 2010, 15(2):127-153.
- [29]杜立民. 我国二氧化碳排放的影响因素: 基于省级面板数据的研究[J]. *南方经济*, 2010(11):20-33.
- [30]沈能, 刘凤朝. 高强度的环境规制真能促进技术创新吗? 基于“波特假说”的再检验[J]. *中国软科学*, 2012(4):49-59.