

污染物总量控制与结构调整

王欢欢 樊海潮 陈诗一*

摘要：行业间结构调整与行业内技术进步在污染物总量控制中起到了什么作用？本文选取了“十一五”规划期间总量控制制度的强化作为准自然实验，研究规制强化对污染排放行为和其他经济行为的影响。我们发现，规制强化促进了制造业企业减排，这一促进作用主要由“减排技术效应”引起。通过结构性分解，本文进一步分析了规制强化的减排效应在不同污染密集度行业间的差异性。我们发现，电力部门在行业“结构调整效应”中扮演着重要作用。

关键词：总量控制制度；技术效应；协同减排

DOI：10.13821/j.cnki.ceq.2023.04.15

一、引言

近些年，“建立生态文明”“绿水青山就是金山银山”等新发展理念凸显了环境保护在我国发展战略中愈发重要的地位。事实上，我国的环境规制日益强化，已构建了基本的生态环境保护法律体系，初步形成了较为完备的环境监管体系。然而，日益强化的环境规制会对企业的污染行为和其他经济行为产生何种影响？如何评估环境规制的有效性？如何发现环境规制对企业行为影响的内在机制？

围绕着以上问题，我们选取了“十一五”规划期间污染物总量控制制度的强化作为准自然实验，以 2001—2010 年企业层面的大气污染物二氧化硫的排放数据为基础，研究了环境规制强化对企业污染排放行为和其他经济行为的影响，通过对污染物排放行业的结构性分解，我们进一步分析了环境规制强化的减排效应在不同污染密集度行业间的差异性。

通过对研究数据的初步分析，我们首先发现了两个特征性事实：（1）“十一五”期间，制造业二氧化硫排放大幅上升的趋势被遏止，且企业减排的程度与环境规制强度（二氧化硫目标减排额度大小）呈正相关关系；（2）“十一五”期间，电力部门的减排远高于非电力部门，同时，非电力部门单位（电力）能耗出现显著下降。基于这些特征事实，我们提出两个假设：（1）“十一五”污染物总量控制制度的强化实施降低企业的污染排放量，且这种减排促进作用与环境规制强度有关。企业所在城市的污染物目标减排额度越大，面临的环境规制强度越大，环境规制对企业污染减排的促进作用越大。（2）在

* 王欢欢，华东师范大学法学院；樊海潮，复旦大学世界经济研究所，复旦大学经济学院；陈诗一，复旦大学中国社会主义市场经济研究中心。通信作者及地址：王欢欢，上海市东川路 500 号，200241；电话：(021) 54344588；E-mail: ahwanghuanhuan@163.com。王欢欢感谢教育部基地重大项目（22JJD790013）和华东师范大学人文社会科学青年跨学科创新团队项目（2021QKT002）的资助，樊海潮、陈诗一感谢国家自然科学基金创新研究群体项目（72121002）的资助。作者感谢匿名审稿人及编辑提出的宝贵意见，文责自负。

环境规制强化对二氧化硫减排的促进作用中,电力部门二氧化硫排放量下降和非电力部门单位(电力)能耗的下降起到重要作用。

为验证以上假设,我们首先基于倍差法开展实证检验,验证2006年后环境规制强化对制造业企业污染排放行为和经济行为的影响。我们发现,环境规制的强化促使了制造业企业的污染物减排。2006年以后,环境规制强化对企业二氧化硫排放影响的系数为-0.024,在1%水平上显著。其中,约67%是由单位产出排污量下降呈现出的“减排技术效应”引起的,产出下降的“规模效应”则贡献了约33%。同时,环境规制强化后,企业的生产投入水平下降,从而降低了企业的产出水平,并最终影响了企业的利润。

进一步地,为验证环境规制强化的减排效应在不同污染强度的行业间的差异性,我们对污染物排放进行了行业结构性分解。我们发现,“十一五”期间二氧化硫减排的主要原因是“行业减排技术效应”,其作用接近90%。就“行业结构调整效应”的贡献而言,电力和非电力部门结构调整的贡献达到20%;而非电力部门内部行业结构性调整为负值(-9.0%)。基于行业污染强度进行三重差分的实证结果表明,若加入电力部门,“十一五”环境规制强化对企业减排的促进作用在重污染行业表现得更为显著,系数为-0.050,在1%水平上显著;若去除电力部门,减排促进作用的行业间差异变得不明显。在“十二五”期间,企业的污染排放量、产值和单位产值的排污水平继续显著下降;并且,“减排技术效应”甚至更加占优于“规模效应”。行业结构性分解表明,“行业减排技术效应”仍是减排的主要动因,而非电力部门内部诸行业间的“行业结构调整效应”有望伴随着环境规制的逐步增强开始起作用。

现有研究环境管制效应的文献多集中于两个方面。一方面是环境规制的减排效应。如Greenstone and Hanna (2014)发现,在空气污染和水污染控制制度强化后,印度的空气质量得到明显改善,而水环境质量并未出现明显好转,原因可能在于公众支持对制度运行的推动作用。另一方面是环境规制的经济效应,如就业(Walker, 2013)、创新(Acemoglu et al., 2016)、生产率(Greenstone, List and Syverson, 2012)、工厂选址(Chen et al., 2018)、外商直接投资(Keller and Levinson, 2002)等方面的影响。此外,亦有不少文献研究环境质量改善的影响因素,除来自上述严格环境规制的影响外,学者还讨论了贸易壁垒下降(陈登科, 2020)、清洁与污染贸易品差异化关税征收(Shapiro, 2021)、绿色信贷(Fan et al., 2021)等因素的作用。在已有文献,特别是中文文献中,使用企业层面的污染排放数据研究企业环境表现的影响因素依然较少。

另外,结构性分解(decomposition)已成为经济文献中分析环境问题的前沿方法。通过对企业污染排放的结构性分解,可知晓“规模效应”“技术效应”“行业调整效应”等对企业污染减排的相应贡献。本文与该类文献亦紧密相关。Levinson (2009)较早将结构性分解方法系统地运用到环境问题中,发现美国制造业污染减排的主要推动力是“技术效应”。^①在此基础上,我们开展了行业层面的结构性分解和企业层面的结构性分解,基于微观的企业数据分析环境规制强化减排效应的主要推动力。更重要的是,通过进一步区分二氧化硫排放和行业结构调整中电力和非电力部门的不同表现,我们发现,

^① 基于结构分解,Shapiro and Walker (2018)则发现,美国制造业的污染减排主要来自更严格的环境规制,而非生产率进步和国际贸易。

电力部门在行业“结构调整效应”中扮演着重要作用。

文章的结构安排如下：第二部分介绍政策背景和特征事实；第三部分介绍实证设计、变量度量 and 数据；第四部分给出实证结果；第五部分为污染物排放行业结构性分解；第六部分为结论。

二、政策背景与特征事实

(一)“十一五”规划期间的主要污染物总量控制

我国的主要污染物总量控制制度始于“九五”规划期间。其间，我国的总量控制基本框架基本建立，控制指标实行从中央到省级，从省级到地、市级，以及从政府到企业的三级分解。然而，“九五”期间的总量控制目标并未真正实现。该制度的失效延续至“十五”期间。^①“十一五”期间，我国实质性地强化了污染物的总量控制，成为我国围绕着总量减排控制的环境规制从失效到有效的转折性时期。

选择“十一五”期间环境规制作为准自然试验具有合理性。一方面，从中央到地方各层级分解二氧化硫总量控制指标时，不同省份、地、市分得的总量减排目标并不相同，这意味着，不同地区面临的环境规制强度有所差异，且具有明确的约束作用。^②这有助于我们更准确地分析不同环境规制强度下企业和政府的不同应对。另一方面，与“九五”“十五”前两期的总量控制失效的结果迥异，“十一五”期间，总量控制制度取得了巨大的成效。这可能与“十一五”期间围绕总量减排目标进行的缜密的制度设计和法律制度的强化实施密不可分。^③总量减排的目标不只是约束性指标，必须严格执行，分省的排放总量控制指标均不得突破。^④污染物减排目标完成情况还与党政官员考核、晋升与责任挂钩。^⑤可以说，“十一五”期间的总量控制制度为日后有效的环境规制竖立了标杆，也为我们的研究提供了理想的分析样本。

此外，选择“十一五”期间二氧化硫控制作为实证分析的对象，还有如下两个突出的优点：其一，在所有类型的污染物中，二氧化硫的减排效果最令人瞩目。^⑥更重要的是，二氧化硫的污染源主要来自含硫燃料（煤、石油等）的燃烧，燃煤二氧化硫排放可占总二氧化硫排放量的85%以上。^⑦因而，二氧化硫的减排与我国能源结构调整、发展

^① 尽管《中华人民共和国国民经济和社会发展第十个五年计划纲要》谨慎地将实行总量控制的污染物类型限缩为二氧化硫等6种污染物，并将控制目标明确化，即，2005年主要污染物排放总量比2000年减少10%；“两控区”二氧化硫排放量比2000年减少20%，然而，正如时任总理温家宝指出，“‘十五’期间我国经济发展的各项指标大多超额完成，但是环境保护的指标没有完成。……其中，2005年二氧化硫排放量比2000年增加了27%，化学需氧量仅减少2%，均未完成削减的控制目标。”（参见温家宝，“全面落实科学发展观 加快建设环境友好型社会”，温家宝总理在第六次全国环境保护大会上的讲话，2006年。）

^② 例如，作为减排幅度最大的省份，上海2010年须减排25.9%（以2005年为基准年），而除去无须减排的若干省份外，需要减排且减排幅度最小的黑龙江省仅须减排2%（以2005年为基准年）。

^③ 例如，《“十一五”主要污染物总量减排核查办法（试行）》《主要污染物总量减排统计方法》《主要污染物总量减排考核办法》相继颁布。

^④ 《国务院关于“十一五”期间全国主要污染物排放总量控制计划的批复》，国函〔2006〕70号。

^⑤ 减排指标分解到省后，原国家环境保护总局随即与各省级政府签订了《“十一五”主要污染物总量削减目标责任书》。考核结果经审定，应作为对各级领导班子和领导干部综合考核评价的重要依据，实行问责制和“一票否决”制。

^⑥ 从“十五”期间的不减反增到“十一五”期间的超额完成减排，若考虑经济增长带来的新增排放，“产业结构调整效应”和“行业减排技术效应”使得SO₂真实排放量下降了37.23百万吨。

^⑦ 环境保护部，《国家污染物环境健康风险名录（化学第一分册）》。北京：中国环境科学出版社，2009年。

清洁能源的战略息息相关。由此,以二氧化硫排放为研究对象也有助于探究绿化我国能源结构的现实路径。其二,与“九五”和“十五”将“两控区”(二氧化硫控制区和酸雨控制区)减排目标单列且设定更高减排目标的思路显著不同,“十一五”期间,二氧化硫排放总量控制将电力行业单列,设定了不同省份的电力行业排放二氧化硫减排总量控制指标。^①这有助于分析污染物减排对电力与非电力部门可能不同的结构调整与技术改进效应。

(二) 特征事实

1. 制造业企业二氧化硫排放特征

2001—2010年间(即“十五”和“十一五”规划期间),全国制造业二氧化硫排放总量发生了显著变化。^②如图1所示,“十五”期间,在经过2002年的短暂下降后,制造业二氧化硫排放总量逐年上升至2005年的最高点。而“十一五”期间,制造业二氧化硫排放总量并未继续上升。

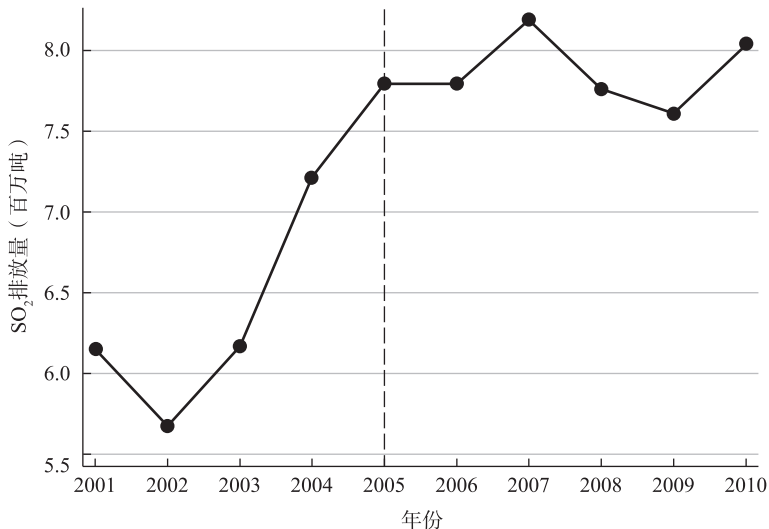


图1 2001—2010年间我国制造业二氧化硫排放总量

随后,我们依据“十一五”各城市二氧化硫的减排目标高低,将城市区分为“环境规制强度大的城市”(目标减排额度高于所有城市目标减排额度平均值的城市)和“环境规制强度小的城市”(目标减排额度低于所有城市目标减排额度平均值的城市),分别计算了2001—2010年间两类城市中制造业企业二氧化硫排放总量的变化。图2表明,2005年之前,无论位于哪一类城市,样本企业的二氧化硫排放总量均呈逐年显著上升的趋势。此时,位于“环境规制强度小的城市”的制造业企业二氧化硫排放总量始终低于位于“环境规制强度大的城市”的制造业企业二氧化硫排放总量。2006年伊始,两类城

^① 为此,燃煤电厂脱硫工程成为重点,“十一五”期间新建燃煤电厂基本要安装脱硫设施,并削减现役火电机组二氧化硫排放,现役机组脱硫装机容量达2.13亿千瓦。主要电力集团也与原国家环境保护部签订了减排的目标责任书。

^② 本文中的制造业是指电力部门以外的其他行业,包括采矿业等。另外,在2005年之后,中国工业企业污染数据库缺少电力部门数据。

市的制造业企业二氧化硫排放总量的涨势出现转折,且“环境规制强度大的城市”中企业的二氧化硫排放出现更明显的下降,不再高于“环境规制强度小的城市”的污染排放水平。

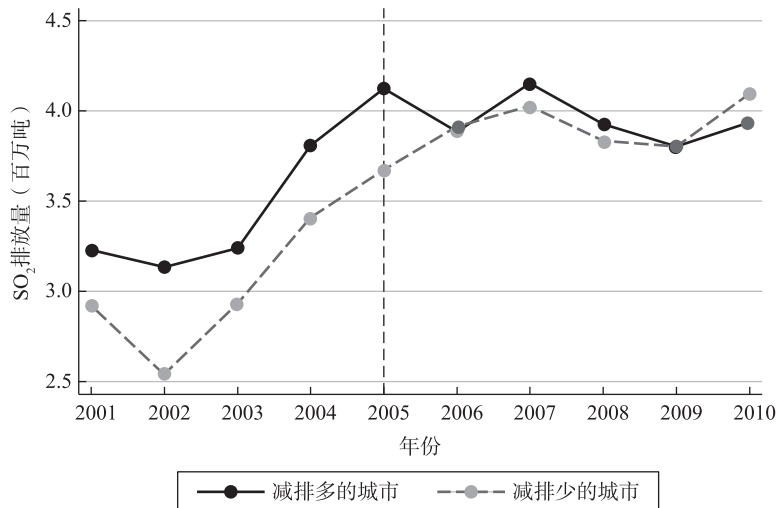


图2 不同规制强度下制造业二氧化硫排放总量

基于以上特征事实,我们提出了本文的第一个假设:

假设一 “十一五”污染物总量控制制度的强化实施会降低企业的污染排放量,且这种减排促进作用与省级环境规制强度有关。企业所在城市的污染物目标减排额度越大,面临的环境规制强度越大,环境规制对企业污染减排的促进作用越大。

2. 电力部门与制造业部门二氧化硫排放的关系

依据图1,尽管“十五”期间制造业二氧化硫排放快速增加的趋势从2006年即被有效遏止,但是,在“十一五”期间的所有年份里,制造业二氧化硫排放总量从未达到过减排10%的目标,甚至有所上升,与基准年2005年相比,反而增加了2%。是什么原因造成了这一排放特征?如前所述,与“九五”和“十五”期间明显不同,“十一五”规划不再将“两控区”减排目标单列,而是将电力行业单列,设定了不同省份的电力行业排放二氧化硫减排总量控制指标。制造业二氧化硫排放与总体减排目标的偏离会否与电力部门的减排活动有关?

为此,我们进一步分解了电力部门和非电力部门二氧化硫排放的变化。如图3所示,“十一五”期间,电力部门二氧化硫排放总量逐年下降,而非电力部门的二氧化硫排放总量并未出现持续下降,反而维持在750万—800万吨的高位。计算两部门的排放占比后,我们发现,尽管电力部门一直是二氧化硫排放的主要来源,但“十一五”期间环境规制变严后,电力部门排放占比逐年下降,而非电力部门的排放占比逐年上升(图4)。这意味着,“十一五”期间二氧化硫排放总量的下降主要来自电力部门的减排。^①为了理解

^① 本文附录A3给出了“十一五”期间电力和非电力部门二氧化硫排放总量的具体数值。具体而言,在“十一五”期间,电力部门SO₂排放下降22.91%;非电力部分SO₂排放反而增加了2.03%;总SO₂排放下降12.87%。“十五”期间电力污染排放占比反而增加,可能是“十五”期间环境管制失败的重要原因。篇幅所限,附录未列示,感兴趣的读者可在《经济学》(季刊)官网(<https://ceq.ccer.pku.edu.cn>)下载。

电力部门 SO₂ 排放大幅下降的原因, 我们进一步观察了火力发电占比, 发现火力发电占比从 2005 年也开始发生显著下降(附录图 A1)。

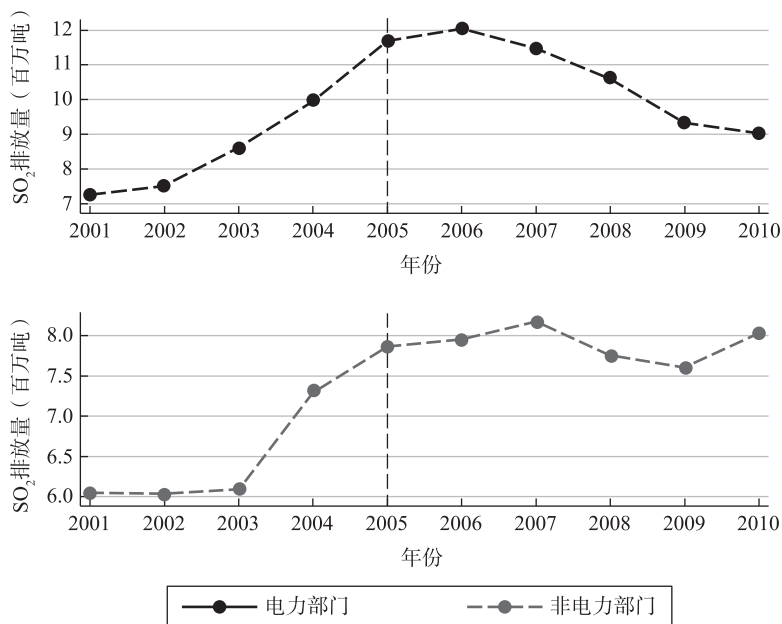


图3 电力部门和非电力部门二氧化硫的排放

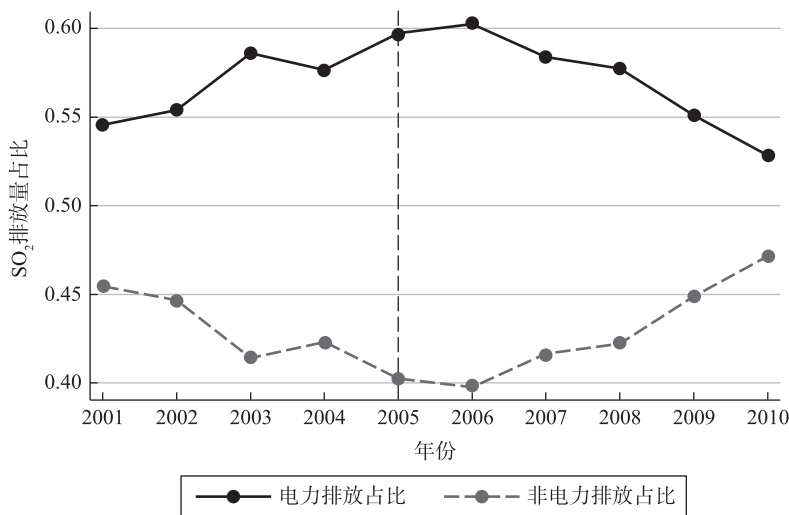


图4 电力部门和非电力部门 SO₂ 排放占比

电力部门既是二氧化硫污染物的排放者, 又是非电力部门生产所需能源的提供者。那么, 除自身污染物减排外, 电力部门会不会通过影响非电力部门能源使用效率促使其减排呢? 依据宏观数据, 我们粗略测算了非电力部门单位产出消耗的电量。结果表明, “十五”期间, 非电力部门单位(电力)能耗不降反升, “十一五”期间则出现了明显下降, 下降比例达 16% (见表 1)。伴随着电能使用效率的提升, 非电力部门使用的其他含硫燃料相应减少, 间接降低了非电力部门因燃料燃烧排放的二氧化硫。

基于以上特征事实，我们提出了本文的第二个假设：

假设二 在“十一五”环境规制强化对二氧化硫减排的促进作用中，电力部门二氧化硫排放量下降和非电力部门单位（电力）能耗的下降起到重要作用。

表1 非电力部门单位（电力）能耗

年份	电力部门产出/非电力部门产出	年份	电力部门产出/非电力部门产出
2001	0.0572	2006	0.0730
2002	0.0570	2007	0.0699
2003	0.0507	2008	0.0630
2004	0.0787	2009	0.0649
2005	0.0761	2010	0.0616
2005—2001	0.0189 (33%)	2010—2006	-0.0114 (-16%)

注：最后一行表示“十五”和“十一五”规划期间非电力部门（电力）能耗的下降程度，括号中为变化比率。

三、实证设计、变量度量 and 数据

（一）实证设计与变量度量

得益于“十一五”总量控制制度的规制强度在时间和空间上的变化，我们利用这一准自然实验，基于倍差法开展实证检验，以进一步分析前述特征事实并验证本文的基本假设。实证估计模型如下：

$$y_{i,t} = \beta R_c \times Post_t + \gamma X_{c,t} + \varphi_i + \varphi_{s,t} + \varepsilon_{i,t}. \quad (1)$$

被解释变量 $y_{i,t}$ 是企业 i 在 t 年的与经济、排污相关的系列活动，包括企业排污总量、企业产出和单位产出排污量以及利润、投资等。 R_c 表示“十一五”污染物总量减排制度下城市层面的二氧化硫减排目标，反映了环境规制的强度。 $Post_t$ 为虚拟变量：若在2006年之前， $Post_t=0$ ；若在2006年及之后， $Post_t=1$ 。 $X_{c,t}$ 是城市层级控制变量，包含了滞后一期的城市人均GDP和人口数量。 φ_i 、 $\varphi_{s,t}$ 分别代表企业固定效应和行业年份固定效应。通过控制企业固定效应 φ_i ，我们可以获知“十一五”环境规制的强化对同一企业在不同年份上污染排放、产量、利润等方面的影响。通过控制行业年份固定效应，我们可以控制相同行业共同的时变特征。考虑到“十一五”环境规制主要落实到城市-年份层面，所有实证结果均聚类到城市-年份层面。^① 回归变量的统计描述见附录表A1。

由于《“十一五”期间全国主要污染物排放总量控制计划》仅仅将二氧化硫的减排目标分解到各省，为了获得更加详尽的城市层面的目标减排额度，我们使用城市的初始二氧化硫污染排放水平推算了“十一五”环境规制下各个城市二氧化硫的减排目标 R_c 。具体计算过程如下：

$$R_c = \Delta SO_{2,p,05-10} \times \frac{Pollution_{c,2005}}{Pollution_{p,2005}}, \quad (2)$$

其中， $\Delta SO_{2,p,05-10}$ 为“十一五”污染物总量控制计划分解到各省二氧化硫减排目标；

① 我们还将标准误差 cluster 到企业层面，这不影响实证结果。

$Pollution_{c,2005}$ 表示 2005 年城市二氧化硫排放量; $Pollution_{p,2005}$ 表示 2005 年省份二氧化硫排放量。^① 省、市级二氧化硫排放总量皆由企业二氧化硫排放量加总而得。

(二) 数据来源

本文的数据主要来源于三个方面: 第一, 企业层面的经济数据来源于中国工业企业数据库, 该数据库为研究中国经济的文献常用(如樊海潮和张丽娜, 2018; Brandt et al., 2012)。该数据库包含了丰富的企业层面信息, 如所有权结构、员工、资本存量、总产量、企业附加值、企业识别信息(如企业名称)以及资产负债表、利润表和现金流量表三大会计报表的完整信息。

第二, 企业层面的排污数据来源于生态环境部的中国环境统计数据库。该数据库涵盖了丰富的工业企业层面的污染排放及相关信息, 包括主要的大气、水、固体废弃物等排放量以及污染物治理设施、资源消耗等信息。考虑到主要研究对象为“十一五”规划中环境规制强化的作用, 我们在基准回归中选取该数据库中 2001—2010 年的企业污染排放数据作为基本数据集。需特别强调的是, 自 2006 起, 数据库剔除了电力部门的排放信息和其他信息。因此, 文中所涉电力部门的数据主要来源于宏观数据。在剔除缺失值和二氧化硫、工业总产出的零值后, 我们主要依据企业名称和法人代码, 将数据库与工业企业数据合并。在对“十二五”规划的拓展讨论中, 我们进一步使用了 2011—2013 年的企业污染排放数据。

第三, 我们还使用了《中国统计年鉴》《中国环境统计年报》, 以及国务院下发的官方文件如《国务院关于“十一五”期间全国主要污染物排放总量控制计划的批复》等, 收集省份、行业层面的污染排放和减排指标数据, 并在此基础上计算行业污染密集程度与城市面临的环境规制强度等指标。

在基准回归中, 基于企业行政区划代码, 我们将企业层面数据与城市层级数据合并, 最终获得了涵盖我国 335 个城市的 238 365 个企业-年度观测样本。^②

四、实证结果

为了支持理论预期, 在本部分, 我们检验了 2006 年污染物总量控制制度变严带来的环境规制强化对企业污染物排放和经济活动的影响。

(一) 基准回归结果

为探究企业污染减排的内在机制, 我们将企业的排污行为分解为:

$$e_{i,t} = y_{i,t} \times \frac{e_{i,t}}{y_{i,t}} \rightarrow \log(e_{i,t}) = \log(y_{i,t}) + \log\left(\frac{e_{i,t}}{y_{i,t}}\right),$$

其中, $e_{i,t}$ 、 $\frac{e_{i,t}}{y_{i,t}}$ 分别表示企业污染排放量和单位产出污染排放量, $y_{i,t}$ 表示企业产出。由

^① 在基本回归中, 我们使用城市层面减排目标。直接使用省份减排目标并不改变实证回归结果; 具体结果见附录表 A4。

^② 在使用合并数据时, 与已有研究类似, 我们舍弃了不准确的 2010 年的数据 (Fan et al., 2018)。

此可见，企业排污总量取决于企业产出和单位产出排污量。产出下降导致的排污总量下降被称作企业“规模效应”，反映了企业为达到减排目标，采取的降低产量的举措；单位产出排污量下降导致的排污总量下降被称作企业“减排技术效应”，反映了企业采取污染治理设施运行、生产技术改进、循环经济改造等实现的减排。因而，企业污染减排取决于“规模效应”和“减排技术效应”的共同作用。通过分解这三个被解释变量，我们可以发现“规模效应”和“减排技术效应”在企业污染减排中的贡献大小。

本文的基准回归结果见表2。其中，第(1)、(2)列对应企业二氧化硫排放量，第(3)、(4)列对应企业产值，第(5)、(6)列对应单位产值的排污水平。所有的实证结果均控制了企业固定效应和年份固定效应。如第(1)列所示，每一单位环境规制强度的增加导致制造业企业二氧化硫排放量显著降低2.7%。此外，第(3)、(5)列的结果则分别表明，2006年后，每一单位环境规制强度的增加使得企业平均产值水平显著下降0.7%，单位产出二氧化硫排污量显著下降2%，即：“减排技术效应”和“规模效应”共同导致了企业污染物减排（ $2.7\% = 2\% + 0.7\%$ ）。第(2)、(4)、(6)列相对于第(1)、(3)、(5)列控制了行业-年份固定效应，并加入了城市层面的控制变量（包括滞后一期的城市人均国内生产总值的对数和滞后一期的城市人口数的对数），实证结果依旧稳健。

表2 基准回归结果

	log SO ₂	log SO ₂	log Output	log Output	SO ₂ per unit	SO ₂ per unit
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$R_c \times Post_t$	-0.027*** (0.008)	-0.024*** (0.008)	-0.007*** (0.002)	-0.008*** (0.002)	-0.020*** (0.007)	-0.016** (0.007)
logGDP per capita		-0.115** (0.058)		0.016 (0.019)		-0.131** (0.060)
logPopulation		-0.011 (0.034)		0.032* (0.019)		-0.043 (0.036)
企业固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
行业年份固定效应	否	是	否	是	否	是
观测值	238 365	238 363	238 365	238 363	238 365	238 363
调整后 R ²	0.793	0.794	0.841	0.843	0.767	0.769

注：***、**、* 分别表示1%、5%、10%水平上显著。括号中为 cluster 到城市-年份层面的标准误差。城市层面的控制变量包括滞后一期的城市人均国内生产总值的对数、滞后一期的城市人口数的对数。

此外，依据基准回归结果，我们发现2006年后，面临不同的环境规制强度，企业调整了相应的减排行为。其中，“减排技术效应”对污染物减排所做的贡献高达67%（ $-0.016 / -0.024$ ）；产量下降带来的“规模效应”的贡献率约为33%。这表明，当环境规制变强，面临更高的目标减排额度压力时，企业将更多地倾向于通过污染治理设施运行、生产技术改进、循环经济改造等减排技术改进实现污染物减排。

为检验基准回归结果的稳健性,我们使用未经合并的企业层面工业企业排污数据进行了稳健性检验,回归中的观测值扩大至基准回归中的两倍。如表3所示,无论是否加入城市层面的控制变量和行业年份固定效应,“十一五”环境规制强化后,企业污染排放量、产值和单位产值的排污水平均有显著下降,由企业单位产值排污水平下降引起的企业“减排技术效应”占优于企业产值下降引起的企业“规模效应”。若以最保守的第(2)、(4)、(6)列的回归结果为基础,可测算出“减排技术效应”污染减排的贡献仍高达68%,这与基准回归结果持平。

表3 “十一五”环境规制的影响(基于企业污染数据全样本的分析)

	log SO ₂	log SO ₂	log Output	log Output	SO ₂ per unit	SO ₂ per unit
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$R_c \times Post_t$	-0.028*** (0.008)	-0.025*** (0.008)	-0.008*** (0.002)	-0.008*** (0.002)	-0.020*** (0.008)	-0.017** (0.007)
log GDP per capita		-0.112* (0.067)		0.001 (0.027)		-0.114* (0.067)
log Population		-0.051 (0.047)		0.002 (0.024)		-0.053 (0.047)
企业固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
行业年份固定效应	否	是	否	是	否	是
观测值	461 405	461 405	461 405	461 405	461 405	461 405
调整后 R ²	0.802	0.803	0.886	0.887	0.804	0.804

注:***、**、*分别表示1%、5%、10%水平上显著。括号中为cluster到城市-年份层面的标准误差。城市层面的控制变量包括滞后一期的城市人均国内生产总值的对数、滞后一期的城市人口数的对数。

(二)企业的经济行为

前述结果表明,环境规制强化后,企业排污量、总产值及单位产值排污水平较环境规制强化前显著下降,这可能进一步影响企业的经济活动。随即,我们分析了该政策冲击对企业利润水平、劳动力投入水平和资本投入水平等经济行为的影响。在表4中,第(1)、(2)列对应企业利润,第(3)、(4)列对应企业劳动力投入,第(5)、(6)列对应企业资本投入。所有的实证结果均控制了企业固定效应和年份固定效应。列(1)表明,“十一五”之后,每一单位环境规制强度的增加使得企业利润显著下降4.5%,这与基准回归结果中企业产值的下降保持一致。类似地,在列(3)和列(5)中,环境规制强化后,企业的劳动力投入和资本投入也显著下降。由此可见,当设立减排目标并辅以严格的制度约束时,企业的生产投入水平下降,产出水平随之下降,企业利润率最终受到冲击。在偶数列中,当加入行业-年份固定效应和城市控制变量后,实证结果依然稳健。

表4 “十一五”环境规制对企业表现的影响

	$\log Profit$	$\log Profit$	$\log Labor$	$\log Labor$	$\log Capital$	$\log Capital$
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$R_c \times Post_t$	-0.045*** (0.009)	-0.045*** (0.009)	-0.003** (0.001)	-0.003*** (0.001)	-0.013*** (0.003)	-0.015*** (0.003)
$\log GDP \text{ per capita}$		0.044 (0.061)		0.037*** (0.013)		0.119*** (0.046)
$\log Population$		-0.035 (0.043)		0.020** (0.009)		0.043* (0.023)
企业固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
行业年份固定效应	否	是	否	是	否	是
观测值	177 385	177 383	238 365	238 363	237 544	237 542
调整后的 R^2	0.733	0.736	0.917	0.918	0.893	0.895

注：***、**、* 分别表示 1%、5%、10% 水平上显著。括号中为 cluster 到城市-年份层面的标准误差。城市层面的控制变量包括滞后一期的城市人均国内生产总值的对数、滞后一期的城市人口数的对数。

(三) 电力行业与非电力行业目标减排额度的不同影响

除规定不同省份的总体控制量外，“十一五”期间全国二氧化硫排放总量控制计划还单列了各省电力部门和非电力部门的二氧化硫排放控制量。电力行业具有污染排放者和能源供应者的双重角色，因而，电力部门的污染减排可能会对非电力部门的减排产生潜在影响。譬如，在环境规制的约束下，若电力部门的产量发生下降，非电力部门的可用电量相应减少，从而可能进一步影响非电力部门的减排行为。为此，在本小节，我们分别使用城市层级电力部门二氧化硫的目标减排额度和非电力部门二氧化硫的目标减排额度刻画了环境规制强度 R_c ，分析环境规制强化对制造业企业污染相关行为的影响，并检验是否存在从电力部门到非电力部门减排的传导机制。

在表 5 中，(1)—(3) 列为环境规制强化后，非电力部门二氧化硫目标减排额度对企业污染排放量、产量以及单位产出污染排放量的影响；(4)—(6) 列表明了电力部门二氧化硫目标减排额度对企业污染排放量、产出以及单位产出污染排放量的影响。回归结果进一步验证了基准回归结果。同时，我们发现，相较于非电力行业减排目标对制造业企业减排的影响，电力行业减排目标对制造业企业减排的影响主要归因于产量下降的企业“规模效应”，其产生的“规模效应”超过 60%（大于“减排技术效应”）。这意味着，当电力行业面临更高减排目标时，电力行业相对产量开始下降，进而导致非电力行业产量的下降。

表5 “十一五”环境规制的影响(基于电力行业和非电力行业的减排目标)

	log SO_2	log $Output$	SO_2 per unit	log SO_2	log $Output$	SO_2 per unit
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$R_c \times Post_t$	-0.068*** (0.012)	-0.007 (0.004)	-0.061*** (0.011)	-0.008 (0.009)	-0.005** (0.002)	-0.003 (0.007)
log GDP per capita	-0.110* (0.057)	0.011 (0.019)	-0.121** (0.059)	-0.135** (0.060)	0.011 (0.020)	-0.146** (0.061)
log $Population$	-0.010 (0.034)	0.030 (0.019)	-0.040 (0.035)	-0.018 (0.035)	0.030 (0.019)	-0.048 (0.036)
企业固定效应	是	是	是	是	是	是
行业年份固定效应	是	是	是	是	是	是
观测值	238 363	238 363	238 363	238 363	238 363	238 363
调整后 R^2	0.794	0.843	0.769	0.794	0.843	0.769

注:***、**、* 分别表示 1%、5%、10% 水平上显著。括号中为 cluster 到城市-年份层面的标准误差。城市层面的控制变量包括滞后一期的城市人均国内生产总值的对数、滞后一期的城市人口数的对数。

五、行业结构性分解

(一) 工业企业二氧化硫排放量的结构性分解

在本小节,通过对二氧化硫排放量的结构性分解,我们将探讨“十一五”期间二氧化硫排放量下降的主要原因,并进一步关注在结构性调整中,电力和非电力部门结构性调整所做的相应贡献。

文献认为,污染物排放总量的变化有三个影响因素:经济的整体规模,经济结构组成,以及生产技术(Levinson, 2009)。参考 Levinson (2009) 的方法,本文以 2005—2010 年为研究区间,以样本中 2005—2010 年持续经营的企业为研究对象,对样本企业二氧化硫年度总排放量进行了结构性分解。如果用 P 表示样本数据的总二氧化硫排放量,那么:

$$P = \sum_s p_s = \sum_s y_s e_s = Y \sum_s v_s e_s.$$

样本数据总二氧化硫排放量等于样本中各行业 s 二氧化硫排放量 p_s 之和,同等于各行业产出量 y_s 乘以其单位产出污染量 e_s 之和。可写为,总产出量 Y 乘以各行业产出比 ($v_s = y_s / Y$) 与单位产出污染量 ($e_s = p_s / y_s$) 的乘积。用向量表示为:

$$P = Yv'e,$$

其中 v 与 e 均为向量,分别包含了样本中各行业的市场份额及其相应的污染密集度。对其全微分可得:

$$dP = v'edY + Yedv' + Yv'de,$$

其中, $v'edY$ 反映了在经济结构与污染密集度不变的情况下,经济规模对二氧化硫排放量的影响,即“行业规模效应”; $Yedv'$ 反映了在经济规模与各行业单位产出污染量

不变的情况下，行业经济结构调整对二氧化硫排放量的影响，即“行业结构调整效应”； $Yv'de$ 则反映了在经济规模与经济结构不变的情况下，生产技术对二氧化硫排放量的影响，即“行业减排技术效应”。

图5展示了样本企业二氧化硫排放量之和的结构性分解结果。如果样本中各行业单位产出污染量、各行业产出比都保持在2005年的水平，并且年度工业总产值等于历史观察值时，二氧化硫年度排放量随时间变化的趋势呈现为图5最上端的虚线。如果各行业单位产出污染量保持在2005年水平，并且各行业产出比、年度工业总产值等于历史观察值时，二氧化硫年度排放量随时间变化的趋势呈现为图5中间的点划线。该线体现了企业产出规模和经济结构组成对二氧化硫排放量的综合影响。图5底部的实线表示样本中二氧化硫年度排放量的实际观察值，描绘了企业产出规模、经济结构组成和生产技术三者对二氧化硫排放的综合影响。在计算样本中各企业二氧化硫年度排放量时，本文将2005年的值计为100，按比例依次换算其他年份的二氧化硫排放量。

在图5中，虚线减去点划线的差可以进一步反映经济结构构成变化对污染物排放的影响，这种行业间结构调整意味着企业可能更多地从污染强度更高的行业转移至污染强度更低的行业，或从后者转移至前者；类似地，不同污染强度行业中企业的扩张或萎缩亦可视为这种结构调整的表现。我们发现，2010年，就包含电力行业的行业结构分解而言，虚线位于点划线的上方，二者之差代表的“行业结构调整效应”占比约为11.3%。这意味着，在包含电力部门的情况下发生了企业从二氧化硫污染强度较高的部门向较低部门的结构转移，从而此时行业结构可能变得更清洁。而“行业减排技术效应”贡献了88.6%，这意味着，企业积极采取污染减排技术，以降低排放水平。

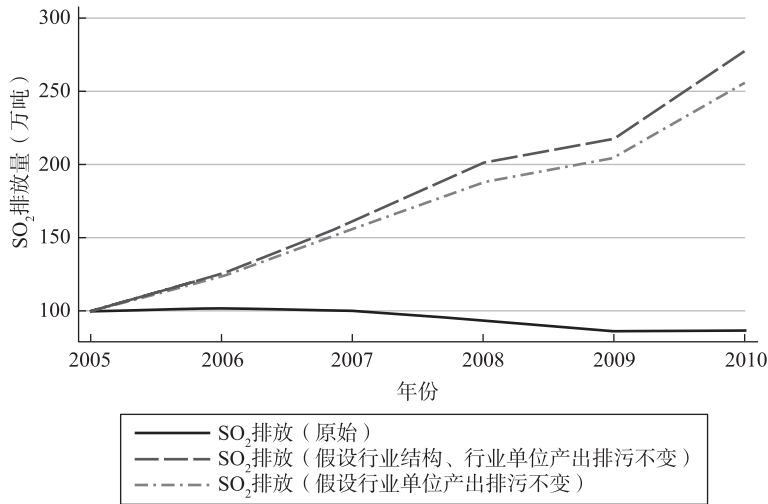


图5 基于宏观数据的SO₂排放分解图 (包括电力部门)

就实际数据而言，从2005年至2010年，SO₂真实排放量从19.54百万吨减少到17.02百万吨。如果忽略“行业结构调整效应”和“行业减排技术效应”，该时间跨度内SO₂真实排放量从19.54百万吨增加到54.25百万吨。可见，“行业结构调整效应”和“行业减排技术效应”使得SO₂真实排放量下降了37.23百万吨。

当然，考虑到电力部门内部的火电部门和非火电力部门在二氧化硫排放贡献上的显

著差异, 我们还将电力行业分为火电和非火电力两个部门, 依照上述方法进行分解。结果表明, 电力行业二氧化硫排放的减少主要来自火电厂自身的减排技术进步和减排措施(附录图 A2)。

随后, 我们去除了电力部门, 重新绘制了二氧化硫排放量的行业结构性分解图。图 6 表明, “行业结构调整效应” 大概贡献了一 9.0%; 而 “行业减排技术效应” 贡献了 109%。意即, 在不包含电力部门的情况下, 非电力部门的企业可能发生了从污染强度较低部门向污染强度较高部门的逆向结构转移, 即更污染的行业可能相对变得更加扩张。综合图 5 和图 6 可见, “十一五” 期间, 二氧化硫排放量下降的主要原因是 “行业减排技术效应”, 其作用接近 90%。就 “行业结构调整效应” 的贡献而言, 电力和非电力部门结构调整的贡献达到 20.3% ($11.3\% - (-9\%) = 20.3\%$)^①; 而非电力部门内部行业结构性调整为负值 (-9.0%)。这还在一定程度上表明, 尽管生产能源的电力部门产出增加速度变缓, 作为能源消耗部门的非电力部门的产出增加速度不仅未随之变缓, 反而不断加快, 呈现出了从电力部门向非电力部门的相对行业结构调整。^② 非电力部门不完全受制于电力部门的产出增速放缓, 合理的解释是其能源利用效率的提升, 这也符合本文表 1 的统计结果: “十一五” 期间, 非电力部门单位 (电力) 能耗出现了明显下降。对于非电力部门内部的行业结构调整而言, 在 “十一五” 规划期间其尚未发挥作用。

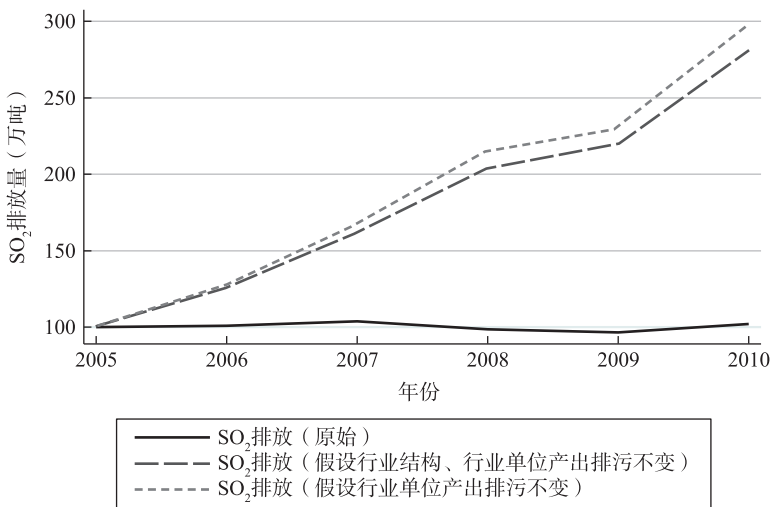


图 6 基于宏观数据的 SO₂ 排放分解图 (不包括电力部门)

(二) 行业间调整的进一步证据

为进一步分析行业污染密集程度对 “十一五” 环境规制强化减排效应的影响, 本文采用三重差分的方法, 估计模型建构如下:

^① 这也进一步验证了本文的基本论断之一, 即电力部门是二氧化硫减排和产业结构更加绿化的结构调整的主要贡献者。

^② 非电力部门的企业可能发生了从污染强度较低部门向污染强度较高部门的逆向结构转移, 即更污染的行业可能相对更加扩张, 其中重要的原因可能在于我国彼时的经济增长和贸易开放的推动, 这也与诸多文献的研究结论相吻合, 即, 环境管制对经济活动的影响常常不能占优于增长和贸易的结构变化 (Copeland and Taylor, 2004; Antweiler et al. 2001)。

$$y_{p,s,t} = \beta_1 R_p \times Post_t \times Dirty_s + \beta_2 R_p \times Post_t + \beta_3 R_p \times Dirty_s + \gamma X_{p,t} + \varphi_p + \varphi_{s,t} + \epsilon_{i,t}, \quad (3)$$

其中, $y_{p,s,t}$ 表示省份行业 SO_2 排放量, R_p 表示 SO_2 省份目标减排量, $Dirty_s$ 表示行业污染强度, 即该行业二氧化硫排放占总排放的比例。^① $X_{p,t}$ 为是省份层级控制变量, 包含了滞后一期的人均 GDP 和人口数量。 φ_p 和 $\varphi_{s,t}$ 分别为省份固定效应和行业时间固定效应。实证结果如表 6 所示。列 (1) 和列 (2) 展示了使用包含电力部门的省份层面年度数据的实证结果; 列 (3) 和列 (4) 呈现了使用不包含电力部门的省份层面年度数据的实证结果; 列 (5) 和列 (6) 为不包含电力部门的微观企业数据的实证结果。^② 结果表明, 若加入电力部门, “十一五” 环境规制强化对企业减排的促进作用在污染强度较大的行业表现更为显著, 若去除电力部门, 减排促进作用的行业间差异变得不明显。这意味着, 环境规制强化后, 相较于更清洁的行业, 污染强度更高的电力部门 SO_2 排放下降更多。而就非电力部门而言, 该现象不显著。这进一步印证了图 5 和图 6 的结果。

表 6 “十一五” 环境规制在不同行业上的影响

	log SO_2	log SO_2	log SO_2	log SO_2	log SO_2	log SO_2
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$R_c \times Post_t \times Dirty_s$	-0.050*** (0.014)	-0.050*** (0.014)	-0.102 (0.082)	-0.101 (0.082)	-0.034 (0.023)	-0.031 (0.024)
$R_c \times Post_t$	0.004** (0.002)	0.002 (0.002)	0.004* (0.002)	0.002 (0.002)	-0.004** (0.002)	-0.004** (0.001)
$Post_t \times Dirty_s$	0.646*** (0.222)		5.105*** (1.473)		1.612*** (0.482)	
log GDP per capita		0.497*** (0.171)		0.504*** (0.174)		-0.111* (0.057)
log Population		-0.027 (0.169)		-0.049 (0.173)		-0.009 (0.034)
企业固定效应	否	否	否	否	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是	否	否
行业固定效应	是	是	是	是	是	是
行业年份固定效应	否	是	否	是	否	是
观测值	10 126	10 126	9 847	9 847	238 365	238 363
调整后 R^2	0.309	0.845	0.391	0.826	0.793	0.794

注:***、**、* 分别表示 1%、5%、10% 水平上显著。括号中为 cluster 到省份-年份层面的标准误差。

① 各行业二氧化硫排放占总排放的比例见附录表 A2。

② 污染排放数据中没有 2005 年以后的电力企业污染排放数据。

考虑到我国主要污染物总量控制制度的延续性,为进一步证实环境规制强化与企业环境、经济行为间的关系,我们还依据“十二五”期间二氧化硫的减排目标检验了环境规制的企业减排效应和行业间调整效应。^①结果表明,“减排技术效应”和“规模效应”共同推动了企业污染物减排,而“减排技术效应”的作用相较“十一五”进一步增大(附录表A5)。换言之,“减排技术效应”在企业污染减排中的作用愈发重要。

相应地,我们还开展了进一步的行业结构性分解。我们发现,相较于“十一五”,“十二五”规划期间非电力部门内部的行业结构调整开始逐渐出现,伴随着环境规制的日益增强,高污染行业的产出增长速度极可能会放慢,乃至产出会出现下降,而低污染行业则与之相反,并将表现为从高污染行业向低污染行业间的调整(附录图A3和图A4)。总体而言,行业结构性分解表明,在“十二五”期间,二氧化硫排放量下降的主要原因仍是“行业减排技术效应”;相较于“十一五”,非电力部门内部诸行业间的“行业结构调整效应”则有望伴随着环境规制的逐步增强开始起作用。

六、结 论

“十一五”规划期间,污染物总量控制制度得到实质性强化。利用这一外生冲击,本文检验了环境规制强化对企业污染排放行为和其他经济行为的影响,通过对污染物排放行业的结构性分解,我们研究了环境规制强化的减排效应在不同污染密集度行业间的差异性。本研究具有重要的政策启示。“十一五”期间二氧化硫减排目标的实现主要是电力部门的减排带来的,制造业的减排力度并不强。这意味着,一方面,制造业尚有大量的减排空间,应当成为下一步污染减排的重点,遗憾的是,尽管“十二五”期间提出了行业污染物减排指标控制,这一情势并未得到根本性改变;另一方面,即便电力部门已大幅度减排,其二氧化硫排放量仍高于50%,高于其他所有部门之和。

此外,我们的研究还表明,严格总量控制的环境管制推动了我国电力部门中火电部门的相对萎缩和更清洁的非火电部门的相对扩张,并提高了非电力部门的能源利用效率,这也契合了当前“碳达峰”和“碳中和”大背景下的能源与生产结构转型的内在需求。未来,在进一步挖掘电力部门减排潜力时,应统筹考虑气候变化控制与大气污染物减排间的相互影响,全面考虑这两类污染物间的联动减排,从而达成空气污染控制、气候变化缓解、公共健康提升等多种效益间的协同效应。

最后,我国污染物总量控制制度的发展历程也为如何强化法律制度的有效性提供了重要启示:不仅应结合污染物的排放源特征实施有针对性的目标控制,还应该强化对政府的监督,提高其在环境保护工作中的责任与能动性。

参 考 文 献

- [1] Acemoglu, D., U. Akcigit, D. Hanley, and W. Kerr, “Transition to Clean Technology”, *Journal of Political Economy*, 2016, 124 (1), 52-104.
- [2] Antweiler, W., B. R. Copeland, and M. S. Taylor, “Is Free Trade Good for the Environment?”, *American Eco-*

^① 囿于数据可得性,我们使用了2011—2013年工业企业的污染数据和2011—2015年宏观层面的污染排放数据。

- conomic Review*, 2001, 91 (4), 877-908.
- [3] Brandt, L., J. Van Biesebroeck, and Y. Zhang, "Creative Accounting or Creative Destruction? Firm-Level Productivity Growth in Chinese Manufacturing", *Journal of Development Economics*, 2012, 97 (2), 339-351.
- [4] 陈登科, "贸易壁垒下降与环境污染改善——来自中国企业污染数据的新证据", 《经济研究》, 2020年第12期, 第98—114页。
- [5] Chen, Z., M. E. Kahn, Y. Liu and Z. Wang, "The Consequences of Spatially Differentiated Water Pollution Regulation in China", *Journal of Environmental Economics and Management*, 2018, 88, 468-485.
- [6] Copeland, B. R., and M. S. Taylor, "Trade, Growth, and the Environment", *Journal of Economic Literature*, 2004, 42 (1), 7-71.
- [7] Fan, H., F. Lin, and L. Tang, "Minimum Wage and Outward FDI from China", *Journal of Development Economics*, 2018, 135, 1-19.
- [8] Fan, H., Y. Peng, H. Wang, and Z. Xu, "Greening through Finance?", *Journal of Development Economics*, 2021, 152, 102683.
- [9] 樊海潮、张丽娜, "中间品贸易与中美贸易摩擦的福利效应: 基于理论与量化分析的研究", 《中国工业经济》, 2018年第9期, 第41—59页。
- [10] Greenstone, M., "The Impacts of Environmental Regulations on Industrial Activity: Evidence from the 1970 and 1977 Clean Air Act Amendments and the Census of Manufactures", *Journal of Political Economy*, 2002, 110 (6), 1175-1219.
- [11] Greenstone, M., J. A. List, and C. Syverson, "The Effects of Environmental Regulation on the Competitiveness of US Manufacturing", 2012, National Bureau of Economic Research, No. w18392.
- [12] Greenstone, M., and R. Hanna, "Environmental Regulations, Air and Water Pollution, and Infant Mortality in India", *American Economic Review*, 2014, 104 (10), 3038-3072.
- [13] Keller, W., and A. Levinson, "Pollution Abatement Costs and Foreign Direct Investment Inflows to U. S. States", *Review of Economics and Statistics*, 2002, 84 (4), 691-703.
- [14] Levinson, A., "Technology, International Trade, and Pollution from US Manufacturing", *American Economic Review*, 2009, 99 (5), 2177-2192.
- [15] Shapiro, J. S., and R. Walker, "Why Is Pollution from US Manufacturing Declining? The Roles of Environmental Regulation, Productivity, and Trade", *American Economic Review*, 2018, 108 (12), 3814-3854.
- [16] Shapiro, J. S., "The Environmental Bias of Trade Policy", *The Quarterly Journal of Economics*, 2021, 136 (2), 831-886.
- [17] Van Rooij, B., G. E. Fryxell, C. W. H. Lo, and W. Wang, "From Support to Pressure: The Dynamics of Social and Governmental Influences on Environmental Law Enforcement in Guangzhou City, China", *Working Paper*, 2012.
- [18] Walker, W. R., "The Transitional Costs of Sectoral Reallocation: Evidence from the Clean Air Act and the Workforce", *The Quarterly Journal of Economics*, 2013, 128 (4), 1787-1835.
- [19] Zheng, S., and M. E. Kahn, "A New Era of Pollution Progress in Urban China?", *Journal of Economic Perspectives*, 2017, 31, 71-92.

Emission Cap and Structural Adjustment

WANG Huanhuan *

(East China Normal University)

FAN Haichao CHEN Shiyi

(Fudan University)

Abstract: We use the strengthening of China's emission target control regime during the "Eleventh Five-Year Plan" period as a quasi-natural experiment to study the influence of environmental regulation stringency on firm's emission and other economic performances, and find that the strengthening of regulations induce firms to cut down their emissions, mainly through the "technology effect". The structural decomposition shows that this emission reduction effect varies across industries with different pollution intensity and the power sector plays an important role in the "structural adjustment effect" among industries.

Keywords: emission cap; technological effect; synergistic reduction

JEL Classification: Q52, Q43, K32

* Corresponding Author: Wang Huanhuan, School of Law, Center for China Economic Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China; Tel: 86-21-54344588; E-mail: ahwanghuanhuan@163.com.