

1 脱硫补贴、激励相容与环境治理¹

2 石光 周黎安 郑世林 张友国

3
4 内容提要：燃煤电厂脱硫电价补贴是我国利用经济手段促进环境保护的重要政策。本文
5 利用 2001–2010 年地级市数据，基于双重差分方法，识别了脱硫补贴对 SO₂ 减排的因果效应。
6 补贴政策有效激励了燃煤电厂投运脱硫设施和 SO₂ 减排。作为政策受益对象的燃煤电厂的数量
7 每增加 1 个，城市 SO₂ 去除率会提高 0.832%，去除量会提高 3.7%，排放量会降低 1%。本文
8 进行了一系列稳健性检验，并分析了政策异质影响。研究表明，设计激励相容的政策，是环
9 境治理的有效途径。

10 关键词：补贴政策 环境保护 二氧化硫 去除率

11
12 Abstract: Subsidy for coal-fired power plants which deploy sulfur dioxide scrubber is an
13 important market-based policy to promote environmental protection. This paper identifies the causal
14 relationship of the subsidy on SO₂ emission using the Difference-in-Difference methodology,
15 utilizing the city level data from 2001 to 2010. It is found that the subsidy effectively stimulates
16 power plants to install and operate sulfur dioxide scrubber, thus reduces SO₂ emission. A series of
17 robustness checks and heterogeneous effect analysis are further provided. Therefore, incentive
18 compatible policy design is the key for pollution abatement.

19 Keywords: subsidy environmental protection sulfur dioxide reduction rate

20 JEL: Q53 Q58 D21

21
22
23
24
25
¹ 作者单位：石光，国务院发展研究中心。周黎安，北京大学光华管理学院。郑世林，张友国，中国社会科学院数量经济技术经济研究所。石光感谢北京大学林肯中心的研究资助。文责自负。

1

2

一、引言

3

随着工业化和城市化持续推进,近年来我国空气污染日益严重。二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)以及可吸入颗粒物(PM₁₀)等主要污染物浓度都远超世界卫生组织(WHO)建议标准。2012年我国二氧化硫排放总量为2117.6万吨,位居世界首位,全国环保重点城市环境空气中二氧化硫年均浓度为0.037毫克/立方米(环保部,2012),是WHO标准的1.8倍。中国创造了全球12%的GDP,却排放了30%的二氧化硫,而美国创造了全球22%的GDP,仅排放了9%的二氧化硫¹。

9

我国空气污染已经造成了严重的经济社会后果。空气污染对人类健康形成巨大威胁,提高了呼吸疾病发病率(陈硕等,2014),降低了预期寿命(Chen等,2013),不利于人力资本积累和长期经济增长。我国三分之一的国土受SO₂和酸雨危害,主要集中在南方和华北等农业高产区,严重不利于农业生产(彭海君,1998,刘连贵等,1996)。酸雨对房屋、路桥等露天基础设施有很强的腐蚀作用,加速了物质资本折旧(张学元等,2002)。因此,如何制定有效的环境政策、形成环境保护的长效机制、实现绿色发展,是当前我国政府面临的重要课题。

15

为抑制二氧化硫排放,我国早在上世纪九十年代起出台了一系列相关政策。但由于没有实现激励相容,大多效果欠佳。2004年的脱硫上网电价补贴,首次利用经济手段矫正了减排的外部性。那么,究竟脱硫补贴政策效果如何?目前还未见相关的实证研究。为此,本文将定量评估脱硫补贴政策的效果。然而,在计量上识别脱硫电价补贴的效果至少需要克服以下困难:其一,脱硫政策是全国一刀切的政策,没有直接的对照组和试验组;其二,近年来我国还出台了一系列各行业普适性的减排政策,如关停并转、加强重点污染源监管、严格征收排污费等,这会混淆脱硫政策的效果。

22

为了识别脱硫电价补贴对SO₂排放的因果关系,我们利用了燃煤电厂分布的空间差异和政策前后的时间差异,基于双重差分方法(DID)定量地评估脱硫补贴的政策效果。我们发现,燃煤电厂密度高的城市,在脱硫电价补贴实施后SO₂减排幅度更大,燃煤电厂数量每增加1个,城市SO₂去除率会提高0.832%,去除量会提高3.7%,排放量会降低1%。动态来看,脱硫补贴政策效果存在先升后降的过程,2007年脱硫补贴从新建电厂扩展到全部电厂后,政策效果有明显增强。火电产业集中度高、国有火电企业比重大的城市,脱硫补贴对减排的作用更突出。在影响机制上,脱硫电价补贴有效激励了企业投运脱硫设施,脱硫能力和运行费用都显著提高。

30

为了检验上述发现的可靠性,我们进行了四项稳健性检验。一是缩短时间窗口,只保留政策变化前后两年的数据,上述发现仍成立。二是钢铁厂密度大的城市在2004年后SO₂减排并不显著,这表明SO₂减排只源于针对火力发电的补贴政策,而非针对各行业的通用减排政策,比如“十一五”时期开始实施的总量减排。三是对于燃煤电厂密度大的城市,2004年后烟尘和粉尘两类污染物排放量并未下降,这与只对脱硫、而不对脱尘进行电价补贴的政策设计是一致的。第四,2000年以来我国火电装机容量高速增长,火电的空间分布变化可能会影响计量识别,我们尝试了不同的初始年份、以及每年的火电密度,结果保持稳健。

37

本研究具有重要的现实意义和政策参考价值。一方面,污染治理是公共政策领域的一大难题,本研究表明激励相容的政策设计是实现有效减排的核心,目前我国很多节能减排政策仍主要依靠行政命令,忽视了企业和个人在给定约束下的行为反应,导致政策效果不佳。另一方面,本文首次严格地识别了电价补贴政策 and SO₂减排的因果关系。SO₂是目前我国最先

1 成功实现排放总量降低的污染物，2006 年达到峰值后开始下降，分析脱硫的成功经验对于其
2 他污染物减排有很强的借鉴意义。

3 本文的其余部分结构如下：第二部分回顾政策背景和相关文献；第三部分介绍计量策略，
4 对数据进行描述统计；第四部分报告主要结果；第五部分进行稳健性检验；第六部分进一步
5 讨论脱硫补贴政策的异质效应；最后在第七部分进行总结。

6 二、研究背景与文献综述

7 SO₂ 排放主要源于化石燃料燃烧。从国际经验看，目前燃煤电厂消耗的化石燃料贡献了美
8 国 SO₂ 排放总量的 73%²，其他全部工业行业只占 20%。从国内情况看，煤炭占当前我国能源
9 消费总量的 68%，是 SO₂ 的主要来源，其中，发电是煤炭消费量最大的行业，全国 48% 的煤
10 炭用于发电；其次是黑色金属冶炼行业，它消耗了 87% 的焦炭和 9% 的煤炭。

11 控制 SO₂ 排放一直是我国环境政策的重点。早在 1992 年，我国就开始要求燃煤电厂脱硫，
12 但因投运脱硫设备提高了发电成本，所以投运率一直很低。1998 年国务院出台了酸雨和二氧
13 化硫控制区（两控区）方案，以城市为单元划定了 109 万平方公里国土，区内限制高硫煤使
14 用、禁止市区新建燃煤电厂、治理超标排放等。但是，随着 2000 年后我国进入重工业化阶段，
15 在此大趋势下，两控区政策收效甚微，2000 年至 2005 年全国二氧化硫排放量不降反增，年增
16 长率超过 5%³。

17 上述政策效果欠佳的根源在于对排污企业激励不相容。原因有两方面，一是排污是典型
18 的负外部性行为，企业没有承担污染的社会成本，导致排污量高于社会最优水平；二是存在
19 严重的信息不对称，政府难以观测企业排污量，监管难度大。所以，仅仅依靠行政手段
20 （command and control），排污企业的行为反应是千方百计逃避监管，政策执行成本高、效果
21 差。

22 为解决激励不相容问题，2004 年我国出台的标杆电价政策规定，新建燃煤脱硫机组上网
23 电价提高 1.5 分/千瓦时。这适度提高了发电厂排污的机会成本，这用科斯定理的思路克服了
24 污染的外部性⁴。2007 年开始，现有燃煤电厂也纳入了脱硫电价补贴范围⁵，政府进一步要求
25 电厂必须建立烟气在线监测系统，与环保部门直接联网，实时向政府传送监测数据，有效缓
26 解了信息不对称，脱硫不达标电厂将受到严惩⁶。因此，脱硫电价补贴政策解决了 SO₂ 减排的
27 两大制约因素，有效激励了企业减排。截止 2012 年底，全国已投运脱硫机组 7.1 亿千瓦，约
28 占全国火电机组装机容量的 87%，脱硫设施投运率由 2005 年不足 60% 提高到了 95% 以上。

29 需要注意的是，1.5 分/千瓦时的补贴额度只能使电厂脱硫保本微利，与此同时，我国的
30 SO₂ 排污费收费标准也很低。根据 Xu(2011)的测算，燃煤电厂在投运脱硫设施（并获得脱硫
31 补贴）和不脱硫（并缴纳 SO₂ 排污费）之间基本上是无差异的。此外，投运脱硫设施需要进
32 行技术改造，程序繁琐，现有燃煤电厂可能更倾向于选择保持现状，不进行脱硫改造。仅仅
33 依靠脱硫补贴并不足以充分激励现有电厂自觉投运脱硫设施，还需要政府加强监管。正因如
34 此，2004 年政策试点时只是针对新建电厂，要求电厂在建设之初就要配套脱硫设施；2007 年
35 在将现有燃煤电厂纳入补贴范围的同时，政府还建设了在线监测系统，以加强执行力度，否
36 则脱硫补贴政策将难以落实。

37 理论上，环境政策可以分为行政手段和经济手段两大类。我国脱硫的成功，很大程度上
38 是行政手段失效、转而使用经济手段的结果。首先，行政手段是政府对排污者进行直接干预，
39 短期内可能有效，但成本高、难以持续。一是限制准入，如禁止设立高耗能高污染企业、限
40 制汽车使用等(Viard 等,2011,Carrillo 等,2013);但排污者会根据自身利益最大化作出行为反应，

1 导致管制失效,如 Davis(2008)发现墨西哥城对汽车的单双号限制最终导致汽车总量增加、空
2 气恶化,因为家庭会购买多辆汽车以规避单双号限制。第二,实行排放许可证制度
3 (Schennach,2000),但不允许交易许可证,获证者可以在限额内排污,超标严惩;这能控制排
4 污总量,但缺乏灵活性,有的企业限额不够用,而有的企业限额却用不完,存在帕累托改进
5 空间。第三,设定排污标准,欧洲制定了严格的汽车尾气排放浓度标准(Faiz 等,1996,Hubschmid
6 等,1997),美国环保署将全国的县分为环境达标县和不达标县两类,对后者施以更严格的环境
7 管制(Greenstone,2004)。第四,直接关停或搬迁污染企业,这在我国较为常见。为筹备 2008
8 年北京奥运会,我国综合运用了上述行政手段,虽然奥运举办期间空气质量显著改善,但之
9 后却很快反弹,没有持续性(Chen 等,2013)。

10 其次,经济手段克服了行政手段的缺点,对排污者激励相容,具有成本有效性。一是排
11 放权交易,政府不仅发放排污许可证,而且允许许可证交易,减排成本高的企业可以向成本
12 低的企业购买许可证;美国 1990 年实施了 SO₂ 排放权交易,SO₂ 排放量从 2308 万吨下降到
13 2010 年的 758 万吨,削减率达到 67%(GAO,1997)。二是环境税,它内部化了排污的负外部性,
14 丹麦对家庭和企业的能源消费征收碳税(Pearson 等,1991),新加坡向汽车使用者征收拥堵费以
15 抑制污染和堵车(Barter,2005)。三是补贴减排者,如我国的脱硫电价补贴、煤炭补贴等政策(刘
16 伟等,2014),它将减排的正外部性内部化,与环境税思路相似。四是环境基金,通过收税或排
17 污费等方式形成专项基金,用于处理责任难以认定的污染或紧急事故,是一种保险机制,如
18 美国环保署的超级基金(Superfund)专门用于处理土壤污染(Greenstone 等,2008)。

19 在行政手段下,政府直接干预排污者行为,由于二者目标并不一致,排污者的行为反应
20 不能带来社会福利最大化,难以实现环境保护和经济发展的最优权衡⁷。实施经济手段也需要
21 政府有较强的监管能力,尤其是监测排放数据、维护排放权交易市场秩序、信息披露、环保
22 执法等;但与行政手段不同,政府只是建立和维护制度,排污者在规则之内有一定的自由选
23 择空间,能促进资源配置的优化。有鉴于此,我们认为我国 2004 年以来利用经济手段实施的
24 脱硫补贴政策会有效促进 SO₂ 减排。

25 无论是行政手段还是经济手段,环境政策的最终目的是通过促进减排获得经济社会效益。
26 现有文献对于污染的经济社会影响进行了大量研究,包括健康、行为和经济增长等。但由于
27 污染的影响是长期性的,因果链条复杂,因此很多研究利用各种环境政策变化构造工具变量,
28 以识别因果关系(Chay 等 2003;陈硕等,2014)。首先,污染的直接后果是对公共健康具有负面
29 影响,这已为各国经验所证实(Brunekreef 等,2002;Gurjar 等,2010)。作为脆弱人群,婴幼儿是
30 研究污染对健康影响的焦点,怀孕期间或婴儿期间受到严重污染会对个人带来长期负面影响,
31 如受教育程度差、收入水平低等(Currie 等,2005;Currie 等,2009)。其次,污染会影响人的行为,
32 人们面对严重污染时会有躲避行为,如减少出行,外出时避开重污染区域等(Moretti 等,2011),
33 污染还会影响学生旷课次数(Currie 等,2009);此外,人们购买住房时会避开污染地区(如垃圾
34 场、火电厂周围),这导致重污染地区房价显著偏低(Chay 等,2005;Davis,2011)。再次,污染
35 会影响经济增长,降低劳动生产率(Zivin 等,2012),甚至导致劳动力供给数量下降(Hanna
36 等,2014),环境管制还会影响企业选址和生产率(Greenstone,2002)。

37 三、数据说明和实证方法

1 (一) 数据说明

2 为考察我国脱硫补贴政策的减排效果，本文结合了城市层面的污染和燃煤电厂分布数据。
3 首先是全国 113 个城市从 2001 年至 2010 年的二氧化硫排放数据，来源于《中国环境年鉴》，
4 主要包括四个变量：第一，排放量是指直接排放到大气中的未经处理的 SO₂ 重量。第二，去
5 除量是指经过处理、未排入大气的 SO₂ 重量，代表了脱硫成效。排放量和去除量之和是二氧
6 化硫产生总量，由此可以算出 SO₂ 去除率=去除量/(排放量+去除量)。第三，脱硫设施脱硫
7 能力是单位时间内能够去除的 SO₂ 重量，反映了脱硫设施的最大处理能力。第四，脱硫设施
8 运行费用是为运行脱硫设施而耗费的成本，包括能源消耗、设备折旧和维修、人员工资、药
9 剂费等，它反映了脱硫设施的利用率。

10 这 113 个城市是环保部确定的全国环境保护重点城市，包括 4 个直辖市、27 个省座城市、
11 5 个计划单列市和 77 个地级市。它们多处于经济发达、人口密集地区，污染的社会经济影响
12 大。2009 年，这 113 个城市的工业 SO₂ 排放量和去除量分别占全国的 50% 和 54%。环保部在
13 这些城市建立设立了 700 个空气自动监测点位，形成完整的环境监测体系，统计资料完善且
14 具有历史可比性。一些重要的环保政策均以这些城市为重点，例如，《国家环境保护“十一五”
15 规划》中明确提出这 113 个城市的大气污染防治是十一五时期的重点。为提高环境统计数据
16 质量，环保部门通过多种途径进行了测算和交叉验证，包括实测、物料衡算和公式计算等方
17 法。凡是安装连续自动在线监测设备并与当地环境监测站联网的单位，要优先采用实时监测
18 数据的汇总数作为排放量数据；未安装连续自动在线监测设备的单位，采用实测法计算排污
19 数据，且必须多次测定样品取值，并由当地环境监测站认定。实测法获得的排放数据要与使
20 用燃料含硫率技术的排放数据进行对照验证，如果差距较大必须进行核实调整。

21 其次，本文使用了国家统计局的规模以上工业数据，它涵盖了全国所有国有工业企业和
22 规模以上非国有工业企业的主要财务变量。我们加总出地级市每年的燃煤电厂数量和总产值，
23 用以衡量燃煤电厂密度。燃煤电厂数量是最直观的密度指标，但其缺点是没有考虑电厂规模。
24 在给定电价的前提下，电厂产值与发电量存在正相关关系，因此我们用产值作为替代密度指
25 标，以相互验证。

26 再次，我们搜集了城市的 GDP 增速、人均 GDP 和产业结构，作为控制变量。我们将三
27 组数据进行匹配，一共得到了 1089 个有效观测。表 1 描述了主要变量的统计特征，城市 SO₂
28 排放量平均为 9.08 万吨，去除量为 7.67 万吨，平均去除率为 32.61%；每个城市平均有 5.61
29 座电厂，平均产值为 14.8 亿元。图 1 (a) 描绘了全部城市的火电厂数量分布情况，这体现了
30 不同城市受政策干预幅度的差异，7 个城市没有燃煤电厂，大多城市的电厂数量集中在 1 到
31 10 座之间，最多的有 27 座。

32 表 1 描述统计

变量名	观测数	平均值	标准差	最小值	最大值
SO ₂ 排放量 (吨)	1089	90824.10	77111.05	103.00	711537.00
SO ₂ 去除量 (吨)	1089	76716.14	129913.75	0.00	1.27e+06
SO ₂ 去除率 (%)	1089	32.61	22.43	0.00	93.75
GDP (10 亿元)	1089	145.28	180.19	3.71	1716.60
人均 GDP (元)	1089	26339.26	18824.46	3520.00	121387.00

工业占 GDP 比重	1089	0.45	0.12	0.06	0.95
电厂数量 (座)	1089	5.61	4.88	0.00	27.00
电厂产值 (10 亿元)	1089	1.48	1.55	0.00	8.68

1

2

3

4

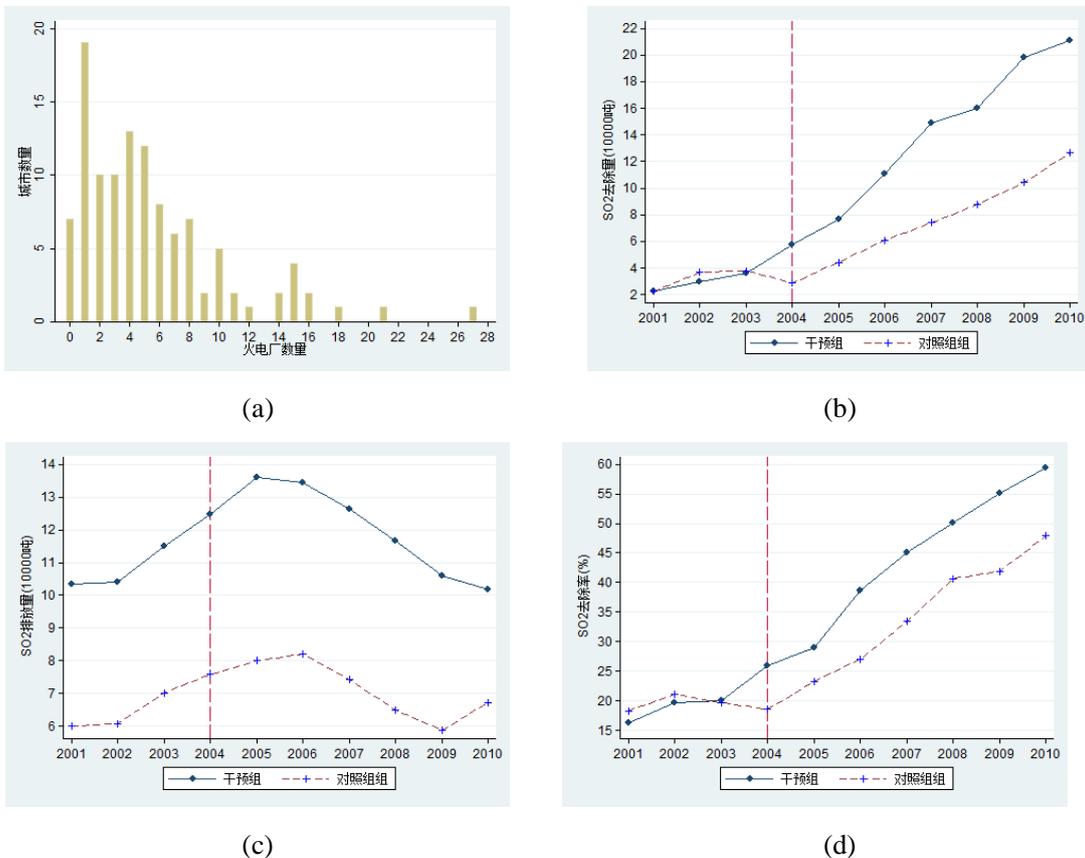
5

6

7

8

在全部样本城市中，我们初步挑选出受脱硫补贴政策影响幅度不同的两组城市，对比这两组城市 SO₂ 排放的动态变化趋势。我们将 2000 年燃煤电厂数量在 1/4 分位数以下的城市作为对照组城市，在 3/4 分位数以上的城市作为干预组城市⁸。如图 1 (b) 所示，两组城市 SO₂ 去除量变化趋势在 2000 至 2003 年基本一致，但 2004 年之后两条曲线出现了明显差距，而且差距日趋扩大；图 1 (d) 的去除率也表现出类似特征；图 1 (c) 中，干预组在 2004 年后的排放量快速下降，而且降幅比对照组更大。这些图都为脱硫补贴政策的有效性提供了初步证据。



9

图 1 去除量、排放量和去除率：干预组和对照组

10 (二) 计量策略

11

为考察脱硫电价补贴政策对于 SO₂ 减排的效果，我们采用下面的回归方程：

12

(1)

13

14

15

16

其中， SO_2 是城市 c 在 y 年的二氧化硫去除率、去除量或排放量； α 是城市固定效应，它可以控制不同城市的固有差异； β 是年份固定效应，如货币政策松紧导致的融资约束强弱、全国性的 SO₂ 减排趋势等； γ 是城市 c 的燃煤电厂密度，我们使用 2000 年的燃煤电厂数量或产值衡量； δ 是虚拟变量，对 2004 年后的观测等于 1； ϵ 是控制变量，包括 GDP、人均 GDP 和工业占 GDP

1 比重，它控制了城市的发展阶段和工业发达程度等因素；是随机扰动项。和的交叉项衡量了
 2 干预组在政策实施后的变化，它剔除了共同的时间趋势影响；我们关心的系数是 δ ，它衡量了
 3 脱硫电价补贴的政策效果。

4 方程（1）本质上是 DID 模型，只是不是虚拟变量，而是连续变量，取值越大则受政策变
 5 化的干预程度越强，这能更精确地刻画脱硫电价补贴对不同城市影响程度。由于城市和年份
 6 固定效应会分别吸收掉交叉项的两个主变量和，所以模型（1）不必再单独控制这两个变量。

7 从逻辑上讲，理想状态下，如果只有燃煤发电行业获得脱硫激励政策（如脱硫补贴），而
 8 其他行业没有脱硫激励政策，那么燃煤发电量更多的城市，其 SO_2 去除量也会更多，相应地，
 9 排放量则更少；在 SO_2 产生总量不变的前提下，这意味着 SO_2 去除率更高。燃煤电厂数量的
 10 多少或产值的大小，是衡量一个城市从脱硫补贴政策的获益程度大小的代理变量。当然，DID
 11 模型的有效性需要严格的条件，即如果没有政策变化，那么干预组和对照组将遵循相同的变
 12 化趋势。一方面，我们尽量增加控制变量，包括、和；另一方面，我们进行了假设检验，只
 13 保留政策变化前 2000 至 2003 年的观测，然后假设 2002 年引入脱硫电价补贴，重复估计方程
 14 （1），如果 δ 的系数估计不显著，则说明对照组和干预组是可比的。

15 四、实证结果

16 本部分首先分析了脱硫电价补贴政策的整体效果，然后讨论了脱硫补贴政策在两个不同
 17 实施阶段的效果差异，并分析了分年影响，最后探讨了脱硫补贴政策促进 SO_2 减排的影响机
 18 制。

19 （一）补贴政策的整体影响

20 计量模型（1）的回归结果报告于表 2 中。我们分别使用了 SO_2 去除率、以及去除量和排
 21 放量的对数值作为被解释变量，每列都完整地控制了城市和年份固定效应。前三列用燃煤电
 22 厂数量衡量密度，结果表明城市的电厂数每增加 1 个，当地 SO_2 去除率会提高 0.832%，去
 23 除量会提高 3.7%，排放量会降低 1%，系数估计都在 99% 置信区间上显著。后三列改用燃煤电
 24 厂产值衡量密度，结果仍然稳健，城市的燃煤电厂产值每提高 1%，当地的 SO_2 去除率会显著
 25 提高 0.756%，去除量会显著提高 3.7%，排放量会降低 1.2%。上述结果表明，燃煤电厂脱硫
 26 补贴显著促进了 SO_2 减排。

27 表 2 脱硫补贴的整体效果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	SO_2 去除率	$\text{Ln}(\text{SO}_2$ 去除量)	$\text{Ln}(\text{SO}_2$ 排放量)	SO_2 去除率	$\text{Ln}(\text{SO}_2$ 去除量)	$\text{Ln}(\text{SO}_2$ 排放量)
火电数量	0.832***	0.037***	-0.010***			
*2004 年后	(0.151)	(0.010)	(0.003)			
$\text{Ln}(\text{火电产值})$				0.756***	0.037*	-0.012*
*2004 年后				(0.273)	(0.022)	(0.007)
年份固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y
城市固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y
控制变量	Y	Y	Y	Y	Y	Y

观测数	1,089	1,089	1,089	1,089	1,089	1,089
R 平方	0.747	0.835	0.938	0.743	0.834	0.938

1 注：*表示 10%置信区间显著。**表示 5%置信区间显著。***表示 1%置信区间显著。

2

3 为验证对照组和干预组具有可比性，我们进行了假设检验：只保留 2001 至 2003 年数据，
4 假设 2003 年开始实施脱硫补贴政策，重复估计模型（1）。结果见表 3，所有的系数估计都不
5 显著，这表明 DID 方法的前提条件成立，在没有脱硫补贴时，对照组和干预组 SO₂ 排放趋势没
6 有显著差异。

7

表 3 假设检验

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	SO ₂ 去除率	Ln(SO ₂ 去除量)	Ln(SO ₂ 排放量)	SO ₂ 去除率	Ln(SO ₂ 去除量)	Ln(SO ₂ 排放量)
火电数量	0.068	0.005	0.002			
*2003 年后	(0.169)	(0.011)	(0.004)			
Ln(火电产值)				0.116	-0.009	-0.004
*2003 年后				(0.242)	(0.015)	(0.007)
年份固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y
城市固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y
控制变量	Y	Y	Y	Y	Y	Y
观测数	322	322	322	322	322	322
R 平方	0.908	0.945	0.984	0.908	0.945	0.984

8 注：*表示 10%置信区间显著。**表示 5%置信区间显著。***表示 1%置信区间显著。

9 (二) 补贴政策的分年影响

10 为了评估脱硫电价补贴政策的长期效果，我们将方程（1）中的虚拟变量改为一组年份虚
11 拟变量，其中，在第 y 年时，如方程（2）所示，它以 2001 年为基期，系数衡量了第 y 年的
12 政策效果。

13

(2)

14 我们利用模型（2）估计了 2002 年后的每一年的减排效果，结果见表 4。同样，前三列以
15 燃煤电厂数量作为密度衡量指标，后三列改用燃煤电厂产值。

16 首先，2002 和 2003 年的全部系数估计都不显著，只有 2004 年之后才出现显著的系数估
17 计。这表明在 2004 年脱硫补贴政策实施前，控制组和干预组城市的 SO₂ 排放和去除量都没有
18 显著差异，二者的差别只发生在政策实施之后。

19 其次，2004 年后，虽然历年的政策效果显著程度有所差异，但系数方向都符合预期。第
20 1 列表明，脱硫补贴政策对 SO₂ 去除率的影响存在先升后降的过程，2004 年 SO₂ 去除率提高
21 了 0.78%，2007 年达到最高峰 1.254%，此后保持在 0.8% 左右。第 2 列表明，SO₂ 去除量明显
22 增加，在 2004 至 2007 年尤为显著。第 3 列以 SO₂ 排放量作为被解释变量，脱硫补贴对 SO₂
23 排放的影响是递增的，2009 年后效果显著，2010 年降幅达到 2.1%。第 4 列用产值衡量电厂
24 密度，效果的峰值也出现在 2007 年。SO₂ 去除率和去除量在 2007 年前后影响最大，这与我国

1 SO₂总量在2006年左右达到峰值开始下降的宏观趋势是一致的。其主要原因是，2007年脱硫
 2 电价补贴政策拓展到了全部现有燃煤电厂，同时政府建立了在线监控系统，政策力度显著加
 3 强。

4 再次，第4至6列都是用产值衡量电厂密度，系数估计的方向都符合预期，支持脱硫政
 5 策的有效性；但是，显著程度不如前三列，这有两个可能原因。一是存在测量误差，由于历
 6 史原因，我国不同发电机组的上网电价各异，这导致产值并不能精确地代表发电量。第二，
 7 耗煤量是决定电厂SO₂产生总量的根本因素，由于不同发电机组的技术特性各异，相同产值
 8 所需的煤耗不同。

9 表4 脱硫补贴的分年效果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	SO ₂ 去除 率	Ln(SO ₂ 去 除量)	Ln(SO ₂ 排 放量)	SO ₂ 去除 率	Ln(SO ₂ 去 除量)	Ln(SO ₂ 排 放量)
密度衡量方式	数量	数量	数量	产值	产值	产值
火电密度*2002	0.100 (0.315)	0.007 (0.022)	0.001 (0.008)	-0.047 (0.561)	-0.014 (0.047)	-0.000 (0.017)
火电密度*2003	0.236 (0.298)	0.016 (0.020)	-0.000 (0.007)	0.333 (0.530)	0.017 (0.043)	0.005 (0.013)
火电密度*2004	0.780*** (0.298)	0.044** (0.019)	-0.004 (0.006)	0.424 (0.506)	0.019 (0.041)	0.000 (0.013)
火电密度*2005	0.821*** (0.285)	0.046** (0.019)	-0.006 (0.007)	0.566 (0.495)	0.023 (0.040)	0.003 (0.016)
火电密度*2006	1.213*** (0.291)	0.068*** (0.022)	-0.010 (0.007)	1.155* (0.604)	0.070 (0.052)	-0.008 (0.013)
火电密度*2007	1.254*** (0.323)	0.061*** (0.022)	-0.010 (0.007)	1.371** (0.668)	0.071 (0.049)	-0.013 (0.014)
火电密度*2008	0.854*** (0.316)	0.034 (0.021)	-0.008 (0.007)	0.466 (0.673)	0.008 (0.046)	-0.014 (0.013)
火电密度*2009	0.941*** (0.349)	0.038 (0.024)	-0.013* (0.007)	0.900 (0.701)	0.048 (0.062)	-0.014 (0.017)
火电密度*2010	0.743** (0.339)	0.014 (0.022)	-0.021*** (0.007)	1.089 (0.733)	0.024 (0.048)	-0.029** (0.014)
年份固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y
城市固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y
控制变量	Y	Y	Y	Y	Y	Y
观测数	1,089	1,089	1,089	1,089	1,089	1,089
R 平方	0.749	0.837	0.939	0.745	0.835	0.939

10 注：*表示10%置信区间显著。**表示5%置信区间显著。***表示1%置信区间显著。

11 (三) 两个政策实施阶段的效果比较

12 脱硫补贴政策在实施上具有两阶段特征。第一阶段是2004至2006年，脱硫补贴只针对

1 新建燃煤电厂，第二阶段是 2007 年之后，脱硫补贴拓展至全部电厂。本节利用计量模型 (3)，
2 对比 2004-2006 和 2007-2010 两个阶段的政策效果：

3
4 (3)

5 其中，衡量了城市 c 新建燃煤电厂的趋势，由于 2004 年后新建电厂选址可能受脱硫补贴
6 政策的影响，存在内生性问题，因此我们用 2001 至 2003 年新建电厂年均数量作为代理变量，
7 每个城市平均每年新建 0.11 座电厂。是代表 2004 至 2006 年的虚拟变量，是代表 2007 至 2010
8 年的虚拟变量。

9 由于新建电厂在两个阶段都享受脱硫补贴，而现有电厂只在第二阶段才享受脱硫补贴，
10 所以模型 (3) 有三个交叉项。和分别衡量了两个阶段新建电厂的效果，体现了第二阶段政策
11 拓展至现有电厂的效果。表 5 报告了回归结果，系数估计都符合预期。在两个阶段，新建火
12 电数量越多，则 SO₂ 去除率和去除量都显著更高，排放量更低。现有火电厂密度大的城市，
13 在第二阶段的减排成效也更显著，SO₂ 去除率更高，排放量更低。

14 第 2 和 3 列系数估计显著程度的差异，体现了两个阶段政策作用点的差异。火电行业的
15 主体是现有电厂，而新增电厂数量相对较少。2004-2006 年，新建电厂会对其废气排放进行脱
16 硫处理，而现有电厂仍会延续原来的排放趋势、不会自觉脱硫；所以这一阶段去除量增幅会
17 更大（主要源于新建电厂的脱硫努力），而排放量（主要源于现有电厂）可能变化并不明显，
18 所以第 2 列中的估计不显著。2007 年后，现有电厂也开始享受脱硫补贴，此时排放量将经历
19 明显下降，所以第三列中系数不显著，而的显著程度很高。

20 表 5 两个政策实施阶段的效果

	(1)	(2)	(3)
	SO ₂ 去除率	Ln(SO ₂ 去除量)	Ln(SO ₂ 排放量)
新建火电数量*2004-2006	18.319*** (5.615)	0.742** (0.343)	-0.109 (0.087)
新建火电数量*2007-2010	20.121*** (6.029)	0.633* (0.341)	-0.179** (0.088)
火电数量*2007-2010	0.315** (0.147)	0.004 (0.009)	-0.008*** (0.003)
年份固定效应	Y	Y	Y
城市固定效应	Y	Y	Y
控制变量	Y	Y	Y
观测数	1,089	1,089	1,089
R 平方	0.748	0.835	0.939

21 注：*表示 10% 置信区间显著。**表示 5% 置信区间显著。***表示 1% 置信区间显著。

22 (四) 补贴政策的影响机制

23 前文结果表明，脱硫电价补贴显著促进了 SO₂ 减排，那么，从微观层面上，脱硫电价补
24 贴政策对 SO₂ 减排的作用机制究竟如何？脱硫电价补贴是否激励了燃煤电厂投资脱硫设施、
25 增加运行时间？为了回答此问题，本节分析了补贴政策对城市脱硫能力和脱硫设施运行费用
26 的变化。我们将脱硫能力和运行费用作为被解释变量，重复方程 (1) 的估计，结果如表 6 所

1 示⁹。如果用燃煤电厂数量衡量密度，补贴政策虽然对脱硫能力的影响不显著，但却显著提高了运行费用，增幅达 3.2%。如果用火电产值衡量密度，那么脱硫补贴使得脱硫能力提高了 7.3%，
 2 同时脱硫设施运行费用提高了 6.4%。这说明，脱硫补贴政策有效激励了企业投资和运行脱硫
 3 设施的积极性，对企业实现了激励相容，这是 SO₂ 去除率得以提高的微观基础。
 4

5

表 6 脱硫补贴的影响机制

	(1)	(2)	(3)	(4)
	Ln(脱硫能力)	Ln(运行费用)	Ln(脱硫能力)	Ln(运行费用)
密度衡量方式	数量	数量	产值	产值
火电数量*2004 年后	-0.007 (0.019)	0.032*** (0.008)		
火电产值*2004 年后			0.073** (0.032)	0.064*** (0.022)
年份固定效应	Y	Y	Y	Y
城市固定效应	Y	Y	Y	Y
控制变量	Y	Y	Y	Y
观测数	1,068	1,086	1,068	1,086
R 平方	0.844	0.758	0.845	0.759

6

注：*表示 10%置信区间显著。**表示 5%置信区间显著。***表示 1%置信区间显著。

7

五、稳健性检验

8

“十一五”以来，全国普遍加强了减排力度，“十一五”规划确立了全国二氧化硫排放
 9 总量五年降低 10%的总目标，围绕这一目标，很多具体政策对高污染的各类行业都有影响，
 10 如制定更严格的排放标准、加强重点污染源监管、强化征收排污费、关停并转高排放企业等。
 11 脱硫电价补贴只是减排政策之一，而且专门针对火电行业。因此，如何从各种可能产生影响
 12 的政策干预中识别脱硫电价补贴政策的效果，是我们面临的一大挑战。给定数据的可得性，
 13 我们尝试了四种稳健性检验。这些稳健性检验可以加强我们回归结果的可信度，但因为数据
 14 的局限，我们并不能完全排除其他政策因素的影响。为节省篇幅，本节只列出了以企业数量
 15 衡量密度的回归结果。

16 (一) 缩短时间窗口

17

从 2001 至 2010 年有十年的跨度，时间窗口太长可能导致估计有偏。一方面，这十年间
 18 我国经济经历了重工业化、国际金融危机等重要变化，这会影响污染趋势。另一方面，在此
 19 期间我国出台了很多节能减排政策，并经历了政府换届，这也会影响计量识别。因此，本节
 20 缩短时间窗口，只保留政策变化的前后两年，基于 2002 至 2006 年样本进行回归。结果如表 7
 21 所示，去除率和去除量都显著提高；排放量系数估计的方向符合预期，但方差较大，这可能
 22 因为 2006 年前我国 SO₂ 排放总量还处于上升期，各地波动较大。

23

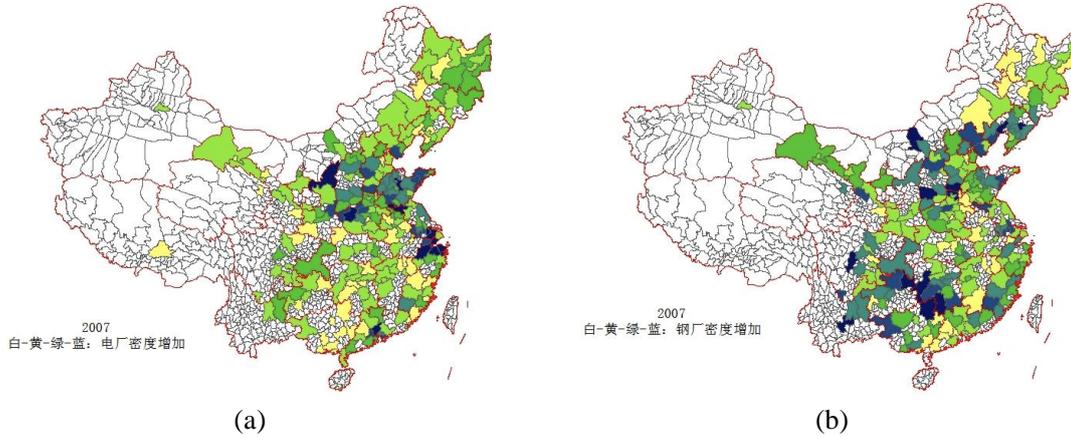
表 7 2002-2006 年样本回归结果

	(1)	(2)	(3)
	SO ₂ 去除率	Ln(SO ₂ 去除量)	Ln(SO ₂ 排放量)

观测数	1,089	1,089	1,089
R 平方	0.749	0.835	0.938

1 注：*表示 10%置信区间显著。**表示 5%置信区间显著。***表示 1%置信区间显著。

2



3

图 2 火电和钢铁的区域分布

4 (三) 烟尘和粉尘

5 燃煤电厂排放中同时包含多种污染物，包括 SO_2 、烟尘、粉尘等。一些共性减排政策可
6 能同时对这些污染物都有效，例如，政府鼓励电厂使用清洁煤炭，因其硫、灰等杂质的含量
7 都比较低，转用清洁煤炭会同时提高 SO_2 、烟尘和粉尘去除量，降低其排放量。如果清洁煤
8 炭鼓励政策在起作用，那么三类污染物的排放量都应有所下降。而在技术上，脱硫设施只针
9 对 SO_2 ，对烟尘和粉尘基本无效¹⁰。利用这一特征，我们进一步使用烟尘和粉尘作为被解释变
10 量，重复估计模型（1），我们预期系数不显著；反之，如果系数显著，则说明是一些同时针
11 对 SO_2 、烟尘和粉尘的政策在起作用，而非仅针对 SO_2 的脱硫电价补贴有效果。表 9 报告了
12 回归结果，仍然以企业数量衡量密度。上半张表以烟尘作为被解释变量，烟尘去除率不升反
13 降，系数为-0.159，烟尘去除量和排放量的系数都不显著。下半张表以粉尘作为被解释变量，
14 除了粉尘排放量略有下降外，粉尘去除率和去除量的系数都不显著。总体来看，这一结果也
15 支持是专门针对 SO_2 的脱硫电价补贴政策在起作用，而非其他针对多种污染物减排的共性政
16 策。

17

表 9 脱硫电价对烟尘、粉尘减排的影响

	(1)	(2)	(3)
A	烟尘去除率	Ln(烟尘去除量)	Ln(烟尘排放量)
火电数量*2004 年后	-0.159** (0.064)	-0.007 (0.006)	-0.003 (0.004)
观测数	1,084	1,084	1,084
R 平方	0.718	0.880	0.899

B	粉尘去除率	Ln(粉尘去除量)	Ln(粉尘排放量)
火电数量*2004年后	0.002 (0.001)	-0.009 (0.011)	-0.006 (0.007)
观测数	1,076	1,076	1,076
R平方	0.618	0.853	0.897
年份固定效应	Y	Y	Y
城市固定效应	Y	Y	Y
控制变量	Y	Y	Y

1 注：*表示 10%置信区间显著。**表示 5%置信区间显著。***表示 1%置信区间显著。

2 (四) 用历年的火电厂数量作为解释变量

3 由于 2000 年以来我国电力装机容量急速上升，燃煤电厂的地理分布在不断变化，因此
4 不同城市的政策干预状态 (treatment status) 会发生变化，例如，2000 年还没有燃煤电厂的
5 城市，到 2005 年可能已建成了燃煤电厂，该城市就从控制组变成了干预组城市。这就影响
6 了控制组和干预组的划分。为此，我们尝试了两种稳健性检验。

7 第一，我们使用 2000 至 2003 年任意一年的燃煤电厂密度作为受政策影响程度的衡量
8 指标，回归结果基本不变 (估计结果在此略去)。此外，通过观察数据我们发现，燃煤电
9 厂的地理布局具有较强的路径依赖，新增燃煤电厂和原有燃煤电厂布局存在显著的正相关
10 关系，所以控制组和干预组城市随时间的变化幅度并不很大。第二，我们将模型 (1) 中的
11 2000 年燃煤电厂密度变量替换为每年的燃煤电厂密度，这捕捉了跨年度间城市燃煤电厂密
12 度的动态变化。表 10 报告了回归结果，燃煤电厂密度每增加一个，SO₂ 去除率提高了 0.99%，
13 去除量提高了 4.7%，排放量下降了 1.3%，系数估计都在 99% 置信区间上显著。

14 因此，使用动态密度衡量指标时系数估计都显著，而且方向符合预期。但是相比使用
15 2000 年电厂密度时的回归结果，这里影响幅度更大，存在一定的高估¹¹。这是因为在原本
16 没有燃煤电厂的城市新建燃煤电厂，会导致这些城市从控制组变为干预组城市，而在使用
17 2000 年密度衡量政策干预程度时，忽略了这一变化，将干预组城市仍归为控制组城市，这
18 导致控制组减排幅度的估计值增大，相应地，低估了政策干预的效果。

19 表 10 脱硫电价对 SO₂ 减排的影响：动态衡量燃煤电厂分布

	(1)	(2)	(3)
	SO ₂ 去除率	Ln(SO ₂ 去除量)	Ln(SO ₂ 排放量)
火电数量*2004年后	0.990*** (0.144)	0.047*** (0.010)	-0.013*** (0.003)
年份固定效应	Y	Y	Y
城市固定效应	Y	Y	Y
控制变量	Y	Y	Y
观测数	966	966	966
R平方	0.746	0.838	0.945

注：*表示 10%置信区间显著。**表示 5%置信区间显著。***表示 1%置信区间显著。

六、进一步分析脱硫补贴政策的异质影响

各地经济结构的差异会导致脱硫补贴政策效果各异。本节分析脱硫电价补贴对不同特征城市的异质效果，我们考察各城市火电行业两个维度的特征，一是产业集中度，二是所有制结构。

（一）城市火电产业集中度

火电行业产业集中度高的城市，政府的监管范围较小，脱硫电价执行的难度可能会更低。相反，如果城市的火电厂数量多、规模小，产业结构分散，那么政府监管难度就会更大。为了验证这一猜测，我们计算了每个城市每年火电行业前三大企业所占的市场份额，记为，然后拓展计量模型（1）如下：

(5)

上式的核心是三元交叉项，它刻画了电厂密度大且行业集中度高的城市，在 2004 年之后是否减排幅度更大，识别了这一效果。同时，我们还控制了、和的两两交叉项，上式中，识别了火电厂密度大的城市在政策实施后的效果，识别了火电行业集中度高的城市在政策实施后的效果，衡量了火电厂密度大且集中度高的城市相对于其他城市的排放水平。需要特别说明的是，我们采用了每年的燃煤电厂密度，而非 2000 年的初始密度，这与上节第四项稳健性检验的策略一致，因为火电厂行业集中度一直在变化，只有用动态密度才能捕捉这一特征。此外，上节表明，无论使用动态密度、还是政策变化前的初始密度，结果都保持稳健。

数据显示，有火电厂的城市，火电厂数量介于 1 至 27 个之间，17%的城市只有一个火电厂，52%的城市火电厂数量不大于 4 个。平均值为 0.94，即前三大火电厂的市场份额为 94%，历年来变化不大。表 11 估计结果表明，行业集中度对脱硫补贴的政策效果有显著影响，对 SO₂ 去除率的系数估计为 2.513，对去除量的系数估计为 0.139，但对排放量的系数不显著。这表明在火电密度大的各个城市中，行业集中度高的城市脱硫补贴对减排的效果尤其大。因此，对于火电厂分散的城市而言，提高行业集中度，加强环境监管力度将会提升脱硫补贴政策的效果，进一步改善城市环境。

表 11 产业集中度对脱硫电价补贴效果的影响

	(1)	(2)	(3)
	SO ₂ 去除率	Ln(SO ₂ 去除量)	Ln(SO ₂ 排放量)

火电密度*2004年后*HHI	2.513*** (0.808)	0.139*** (0.039)	0.012 (0.016)
火电密度*2004年后	-0.601 (0.526)	-0.043* (0.024)	-0.019* (0.010)
火电密度*HHI	-2.980*** (0.875)	-0.106** (0.045)	0.010 (0.017)
2004年后*HHI	-5.013 (4.121)	0.252 (0.283)	0.158 (0.097)
火电密度	0.498 (0.611)	0.002 (0.030)	0.018* (0.011)
HHI	5.239 (4.816)	-0.262 (0.362)	-0.111 (0.109)
年份固定效应	Y	Y	Y
城市固定效应	Y	Y	Y
控制变量	Y	Y	Y
Observations	980	980	980
R 平方	0.747	0.844	0.944

1 注：*表示 10%置信区间显著。**表示 5%置信区间显著。***表示 1%置信区间显著。

2 (二) 城市火电的所有制结构

3 由于国有企业承担的社会责任较多，政府对国有企业的影响力更强，所以国有企业可
4 能更具有减排的积极性。数据显示，我国火电行业的国有比重在不断下降，从 2000 年的
5 63%降至 2009 年的 32%，这与 2000 年以来我国电源投资主体多元化趋势是一致的。

6 与分析行业集中度的思路相同，我们计算了每个城市每年火电行业的所有制结构，即
7 全部火电企业中国有企业数量所占比重，记为，并将计量模型（5）中的替换为，其他都不
8 变。估计结果如表 12 所示，三元交叉项的各列系数估计中，只有去除率有显著影响，去除
9 量和排放量系数估计方向合理，但不显著，这表明脱硫补贴政策在国企比重高的城市效果
10 更突出。

11 表 12 所有制结构对脱硫电价补贴效果的影响

	(1)	(2)	(3)
	SO ₂ 去除率	Ln(SO ₂ 去 除量)	Ln(SO ₂ 排 放量)
火电密度*2004年后*国企比例	1.763** (0.878)	0.034 (0.055)	-0.012 (0.017)
火电密度*2004年后	0.578** (0.225)	0.032** (0.014)	-0.009* (0.005)
火电密度*国企比例	-2.172*** (0.800)	-0.051 (0.052)	0.025 (0.017)

2004年后*国企比例	-11.185** (4.824)	-0.117 (0.332)	0.181* (0.098)
火电密度	-0.819*** (0.301)	-0.049** (0.020)	0.020*** (0.007)
国企比例	11.232*** (4.075)	0.118 (0.264)	-0.233** (0.095)
年份固定效应	Y	Y	Y
城市固定效应	Y	Y	Y
控制变量	Y	Y	Y
Observations	980	980	980
R 平方	0.747	0.842	0.944

1 注：*表示 10%置信区间显著。**表示 5%置信区间显著。***表示 1%置信区间显著。

2 七、结论：政策含义与福利经济学讨论

3 2012 年以来，我国空气污染明显加重，雾霾成为我国经济社会发展的重大挑战，对公
4 共健康形成了巨大威胁。环境污染不仅不再是换取经济增长的代价，相反，污染导致的交
5 通延误等直接不利于经济增长，间接损失则更大。总结环保政策的经验教训，对于未来我
6 国全面完善环保政策至关重要。

7 本文利用我国地级市数据，基于严格的计量方法，识别了脱硫电价补贴政策对 SO₂ 减
8 排的因果效应。我们发现，城市的燃煤电厂的数量每增加 1 个，SO₂ 去除率会提高 0.832%，
9 去除量会提高 3.7%，排放量会降低 1%。动态来看，在脱硫电价补贴全面推广完善的 2007
10 年，政策效果幅度最大。在影响机制上，脱硫电价补贴有效激励了燃煤电厂投运脱硫设施，
11 燃煤电厂数量每增加 1 个，脱硫运行费用会提高 3.2%。如果改用燃煤电厂产值衡量电厂密
12 度，上述结果仍然成立。不仅如此，我们还进行了一系列稳健性检验，这些证据都支持脱
13 硫电价补贴政策是实现 SO₂ 总量减排的关键。这表明，燃煤电厂脱硫电价补贴是利用经济
14 手段促进减排的成功实践，它矫正了企业排污的外部性，使企业减排的收益内部化，实现
15 了减排政策的激励相容，带来了巨大的生态、经济和社会效益。借鉴脱硫补贴的成功经验，
16 2013 年我国在全国范围推广脱硝电价补贴，补贴标准为 0.8 分/千瓦时。对不同经济结构的
17 城市，脱硫电价补贴的政策效果有一定差别。火电行业产业集中度高的城市，脱硫补贴的
18 政策效果更突出。火电产业集中度低的城市，由于监管范围大、难度高，政策效果会有一
19 定折扣，未来需进一步加强这些城市的政策落实。国有火电厂占比高的城市，SO₂ 减排成
20 效也更突出。

21 需要指出的是，在脱硫发电补贴政策下，公众为换取清洁大气付出了一定代价。2012
22 年我国发电总量达 4.94 万亿千瓦时，其中 80% 是火电，假设全部燃煤电厂都获得脱硫电价
23 补贴，以此推算，全国的补贴总额高达 600 亿元。根据现行政策¹²，燃煤机组执行脱硫加价
24 后电网企业增加的成本，通过调整终端用户销售电价解决。这意味着数百亿元的脱硫电价
25 补贴最终主要由消费者买单，包括居民和用电企业等。从初始权利界定的角度看，脱硫电
26 价补贴意味着将空气的初始产权界定给了排污企业，公众需要付费才能换来企业不排污。
27 当然，探讨减排成本的分担机制已超出了本文探讨的范畴，这是下一步研究的重要方向。

1 最后, 脱硫电价补贴是我国减排的成功经验, 但这并非唯一有效的做法。美国上世纪
2 九十年代以来实施了 SO₂ 排放权交易 (cap and trade) 政策, 根据美国环保署测算, 排放权
3 交易不仅成功实现了 SO₂ 减排, 而且具有成本有效性, 实际成本仅为预计成本的一半。比
4 较补贴和排放权交易两种政策工具的效果差异, 是另一个重要的研究方向。目前我国在碳
5 排放领域已引入了排放权交易方式, 2013 年开始在七个省市进行试点, 政策效果仍待进一
6 步观察和研究。

8 参考文献

9 [1] Barter, P., "A Vehicle Quota Integrated with Road Usage Pricing: A Mechanism to Complete
10 the Phase-out of High Fixed Vehicle Taxes in Singapore", *Transport Policy*, 2005, Vol.12(6), 525-536.

11 [2] Brunekreef, B., and S. Holgate. "Air pollution and health." *The lancet* 360.9341 (2002):
12 1233-1242.

13 [3] Carrillo, P., A. Malik, and Y. Yoo, "Driving Restrictions that Work? Quito's Pico y Placa
14 Program", 2013, *Working Paper*.

15 [4]陈硕, 陈婷. 空气质量与公共健康: 以火电厂二氧化硫排放为例[J]. *经济研究*, 2014, 49(8):
16 158-169.

17 [5] Chay, K., C. Dobkin, and M. Greenstone. "The Clean Air Act of 1970 and adult
18 mortality." *Journal of Risk and Uncertainty* 27.3 (2003): 279-300.

19 [6] Chay, K., and M. Greenstone. "Does Air Quality Matter? Evidence from the Housing
20 Market." *Journal of Political Economy* 113.2 (2005).

21 [7] Chen, Y., A. Ebenstein, M. Greenstone, and H. Li, "Evidence on the impact of sustained
22 exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River policy", *Proceedings of the*
23 *National Academy of Sciences*, 2013, Vol.110(32), 12936-12941.

24 [8] Chen, Y., Z. Ginger, K. Naresh, and G. Shi, "The Promise of Beijing: Evaluating the Impact of
25 the 2008 Olympic Games on Air Quality", *Journal of Environmental Economics and Management*, 2013,
26 Vol.66(3), 424-443.

27 [9] Currie, J., and M. Neidell. "Air Pollution and Infant Health: What Can We Learn from
28 California's Recent Experience?." *The Quarterly Journal of Economics* (2005): 1003-1030.

29 [10] Currie, J., Hanushek, E. A., Kahn, E. M., Neidell, M., & Rivkin, S. G. (2009). "Does Pollution
30 Increase School Absences?." *The Review of Economics and Statistics* 91.4 (2009): 682-694.

31 [11] Currie, J., Neidell, M., & Schmieder, J. F. (2009). Air pollution and infant health: Lessons from
32 New Jersey. *Journal of Health Economics*, 28, 688-703.

33 [12] Davis L., "The effect of driving restrictions on air quality in Mexico City", *Journal of Political*
34 *Economy*, 2008, Vol.116(1), 38-81.

35 [13] Davis, W. "The Effect of Power Plants on Local Housing Values and Rents." *The Review of*
36 *Economics and Statistics* 93.4 (2011): 1391-1402.

37 [14] Gurjar, R., L. Molina, and C. Ojha, eds. *Air pollution: health and environmental impacts*. CRC
38 Press, 2010.

39 [15] 刘连贵、曹洪法、熊严军, "酸雨和SO₂复合污染对几种农作物的影响", 《环境科学》,
40 1996年第2期, 第16-19页。

41 [16]刘伟, 李虹. 中国煤炭补贴改革与二氧化碳减排效应研究[J]. *经济研究*, 2014, 49(8):

1 146-157.

2 [17] Faiz, A., C. Weaver, M. Walsh, "Air Pollution from Motor Vehicles: Standards and
3 Technologies for Controlling Emissions", 1996, World Bank.

4 [18] GAO, "Overview and Issues on Emissions Allowance Trading Programs", *US General*
5 *Accounting Office, 1997, GAO/T-RCED-97-183.*

6 [19] Greenstone, M., "Did the Clean Air Act Cause the Remarkable Decline in Sulfur Dioxide
7 Concentrations?", *Journal of Environmental Economics and Management*, 2004, Vol.47(3), 585-611.

8 [20] Greenstone, M., J. Gallagher, "Does Hazardous Waste Matter? Evidence from the Housing
9 Market and the Superfund Program", *The Quarterly Journal of Economics*, 2008, Vol.123(3), 951-1003.

10 [21] Greenstone, M. "The Impacts of Environmental Regulations on Industrial Activity: Evidence
11 from the 1970 and 1977 Clean Air Act Amendments and the Census of Manufactures." *Journal of*
12 *Political Economy* 110.6 (2002): 1175-1219.

13 [22] 环保部, 2012: "2012年中国环境状况公报"。

14 [23] Hanna, R., and P. Oliva. "The effect of pollution on labor supply: Evidence from a natural
15 experiment in Mexico City." *Journal of Public Economics* (2014).

16 [24] Hubschmid, C., P. Moser, "The Cooperation Procedure in the EU: Why was the European
17 Parliament Influential in the Decision on Car Emission Standards?", *Journal of Common Market Studies*,
18 1997, Vol.35(2), 225-242.

19 [25] Moretti, E., and M. Neidell. "Pollution, Health, and Avoidance Behavior: Evidence from the
20 Ports of Los Angeles." *Journal of Human Resources* 46.1 (2011): 154-175.

21 [26] Pearson, M., S. Smith, "The European Carbon Tax: An Assessment of the European
22 Commission's Proposals", 1998, Working Paper.

23 [27] 彭海君, "珠江三角洲酸雨及其造成的农作物损失的研究", 《环境与开发》1998年第2
24 期, 第19-20页。

25 [28] Schennach, S., "The Economics of Pollution Permit Banking in the Context of Title IV of the
26 1990 Clean Air Act Amendments", *Journal of Environmental Economics and Management*, 2000,
27 Vol.40(3), 189-210.

28 [29] Viard V., S. Fu, "The Effect of Beijing's Driving Restrictions on Pollution and Economic
29 Activity", 2011, *SSRN 1917110*.

30 [30] Xu, Yuan, 2011, "Improvements in the Operation of SO₂ Scrubbers in China's Coal Power
31 Plants," *Environmental Science & Technology* 45(2): 380-385.

32 [31] 张学元、韩恩厚、李洪锡, "中国的酸雨对材料腐蚀的经济损失估算", 《中国腐蚀与防
33 护学报》, 2002年第5期, 第157-160页。

34 [32] Zivin, G., and M. Neidell. "The Impact of Pollution on Worker Productivity." *The American*
35 *Economic Review* 102.7 (2012): 3652-3673.

36

37

¹ 根据美国环保署数据, 2011年美国SO₂排放总量为687万吨。参考:

<http://www.epa.gov/ttn/chief/trends/>

² 参考 <http://www.epa.gov/airquality/sulfurdioxide/>

³ 2000 年全国二氧化硫排放总量为 1995 万吨，2005 年为 2549 万吨，2006 年达到峰值 2588 万吨，此后递减。

⁴ 科斯认为，在交易费用低的情况下，给负外部性的制造者补贴和对负外部性的制造者征税是一样的，补贴成为排污者的机会成本而进入了他们的考虑范围。

⁵ 参考《关于印发发现有燃煤电厂二氧化硫治理“十一五”规划的通知》（文号:发改环资[2007]592 号，2007 年 03 月 28 日）、《燃煤发电机组脱硫电价及脱硫设施运行管理办法》（2007 年 5 月 29 日）。

⁶ 电厂必须 100% 脱硫，否则面临处罚：（1）脱硫设施投运率在 90% 以上的，扣减停运时间所发电量的脱硫电价款。（2）投运率在 80%—90% 的，扣减停运时间所发电量的脱硫电价款并处 1 倍罚款。（3）投运率低于 80% 的，扣减停运时间所发电量的脱硫电价款并处 5 倍罚款。

⁷ 当然，我们不是说补贴等经济手段可以完全替代行政处罚。给定某个补贴水平，有些企业认为不值得而不采取任何措施继续污染，则需要环境部门的行政处罚来补充。现实中一般将两者组合起来实施。但是，如果检测脱硫的成本比较低，那么脱硫补贴是比行政处罚更有效的方式。因为罚款有更多来自监管者的任意性和相应的行政和监管成本，而补贴则一般不会有这种任意性和监管成本。

⁸ 这样分类的好处是对照组和干预组城市数量基本相同，可比性强。另外，我们也尝试了另一种划分方式：2000 年燃煤电厂数量在中位数以下的城市作为对照组城市；2000 年燃煤电厂数量在中位数以上的城市作为干预组城市，结果变化不大。

⁹ 脱硫能力是指每小时处理 SO₂ 的潜在最大重量，这是脱硫设备投资所形成的资本存量。运行费用是指运行脱硫设施所需的成本，包括脱硫催化剂等，如果安装了脱硫设施但在日常不运行，那么脱硫费用就不会增加。

¹⁰ 脱硫使用的是专用于 SO₂ 的催化剂。

¹¹ 也可以理解为，两个估计值构成了一个区间，是脱硫电价补贴政策效果估计的上限和下限。

¹² 参考《燃煤发电机组脱硫电价及脱硫设施运行管理办法》第六条。这里具体有两种情况：2004 年之前，新建电厂或发电机组的上网电价由政府逐一审批确定，所以“一机一价”，实施脱硫补贴后，补贴这些电厂的成本直接传导至销售电价。2004 年后，我国电价体制改革，实行标杆电价，同一省内统一制定新建机组电价，脱硫补贴已直接包含在标杆电价中。