

# 违法排污视角下京津冀 工业颗粒物排放研究

李玉红 王 皓

**摘 要** 工业排放颗粒物是细颗粒物污染的重要来源。已有污染物排放核算研究关注企业的污染治理技术而忽略其违法排放行为，从而影响污染源识别和治理对策的精准性。在京津冀地区工业迅速增长和灰霾污染加重的背景下，本文运用情景分析法，引入企业违法排污参数，将企业对环境规制服从的差异性纳入工业颗粒物排放量核算框架，估算出2004年和2013年京津冀主要大气污染行业颗粒物产生量、最小排放量以及各种违法排污情景下的超标排放值。估算显示，工业颗粒物产生量和最低排放量相差几十倍甚至上百倍；随着企业违法排污行为的增加，颗粒物排放量急剧上升。在违法排污比例为15%的情景下，工业颗粒物排放量为430万吨，细颗粒物108万吨。京津冀灰霾治理须严控企业违法排污行为。

**关键词** 灰霾 细颗粒物 ( $PM_{2.5}$ ) 排放清单 环境执法 违法排污  
[中图分类号] X51; F205 [文献标识码] A [文章编号] 2095 - 851X (2019)  
01 - 0016 - 15

## 一、引言

近期中国多地频繁出现以细颗粒物 ( $PM_{2.5}$ ) 为首要污染物的灰霾天气。党的十九大提出“持续实施大气污染防治行动，打赢蓝天保卫战”。国务院已发布《打赢蓝

---

**【基金项目】** 中国社会科学院登峰计划重点学科建设项目“环境技术经济学”；国家自然科学基金面上项目“中国汽车行业资源依赖关系的网络特征及其对企业战略的影响”（批准号：71772038）；北京市社会科学基金青年项目“北京市机动车限购限行政策评估”（批准号：15JGC149）。

**【作者简介】** 李玉红（1976 - ），中国社会科学院数量经济与技术经济研究所，中国社会科学院环境与发展研究中心，副研究员，邮政编码：100732；王皓（1978 - ），对外经济贸易大学国际商学院，副教授，本文通讯作者，邮政编码：100029。

致谢：感谢中国社会科学院郑玉歆研究员和郑易生研究员对本文提出的建设性意见，感谢审稿专家和编辑部提出的宝贵建议，当然文责自负。

天保卫战三年行动计划》，将大气污染治理、降低  $PM_{2.5}$  浓度当作目前中国环境治理的重中之重。

京津冀是  $PM_{2.5}$  污染重灾区之一。2018 年底，经过五年大气环境治理，北京市  $PM_{2.5}$  年均浓度下降到  $51\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，依然远高于世界卫生组织（World Health Organization, WHO）提出的  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  的健康指导值。地理遥感研究对京津冀大气污染的时空分析表明，2000—2014 年该区域  $PM_{2.5}$  浓度增加，污染区呈扩散趋势（王桂林等，2017；刘海猛等，2018）。这除了与京津冀特殊的地理位置和气象条件有关外，巨量的人为排放起到了决定性的作用（王跃思等，2013）。在人为排放源中，工业排放是  $PM_{2.5}$  污染形成的重要来源（周曙东等，2017）。工业颗粒物不仅包括工业生产工艺产生的粉尘，而且包括生产过程中由于煤炭燃烧而产生的烟尘。从全国范围看，工业排放占  $PM_{2.5}$  总排放量的 68.6%（Cao et al., 2011），对于产业结构偏重的京津冀地区来说，工业源排放的贡献更大。

然而，迄今为止，学术界对钢铁、水泥等行业颗粒物排放量的研究较多（雷宇等，2008；田刚等，2014；薛亦峰等，2014；汪旭颖等，2016；伯鑫等，2017；段文娇等，2018；王彦超等，2018）。这些研究关注企业采用的技术工艺以及行业的污染控制技术分布，在企业完全采取污染控制、不存在违法排污的情况下，能够较为准确地估算行业污染物排放清单。然而，这类研究通常忽视企业不服从环境规制、超标排放等违法排污（Pollution Violation）行为对污染物排放清单的影响。事实上，有学者指出，由于缺乏对农村地区和乡镇企业的了解，污染物排放核算具有很大的不确定性（Cao et al., 2011）。

环境规制是对企业或个体排污行为所规定的法律法规等强制性制度约束，包括法律立法（Legislation）和监管执行（Monitoring and Enforcement）。如果没有法律监管执行，那么环保法律文本就成为非强制约束的指导意见（Shimshack, 2014）。“违法排污”泛指不遵守环境保护法律法规的超标排污行为，如违反“三同时”规定，或已安装防治污染设施，但设备闲置、不正常运行等导致的污染物排放超标行为。<sup>①</sup>也就是在有法可依的情况下，企业没有依法治污而出现的超标排污现象。根据包群等（2013）研究，中国各地环境立法并没有起到有效改善环境质量的作用，而环境执法对于控制污染物排放起到关键作用。即使在发达国家，企业环境违法行为都不可能完全被发现，这在各国都是一个难题，而中国环保执法不严、企业违法排污现象尤其严重。首先，违法成本低和守法成本高一直是中国环保长期以来没能根治的一个痼疾（杨朝飞，2012）。其次，环境执法经常让位于经济增长（何燕，2010），且与环保机构能力、企业地位、所在地区公众环保和健康意识等因素密切相关（Tilt, 2007；彭向刚、向俊杰，2013）。根据 2016 年中国各级环境保护部门对 1019

<sup>①</sup> 根据《环境保护法》，“建设项目中防治污染的设施，应当与主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用。防治污染的设施应当符合经批准的环境影响评价文件的要求，不得擅自拆除或者闲置”。

家钢铁企业的现场检查,发现173家企业存在环境违法行为(环境保护部办公厅,2016),企业违法排污比例为16.98%。2017年原环境保护部在全国范围开展的砖瓦行业环保执法检查,3.2万家企业中仅51%的企业办理了环评手续,35%的企业安装除尘脱硫设施,79%的企业污染防治设施和在线监控设施不正常运行(环境保护部办公厅,2018)。虽然违法排污行为在业界和学术界成为共识(秦虎、张天宇,2006),但是在污染物排放核算领域却往往忽视这一点,导致污染物实际排放量被低估。

本文运用情景分析法,考虑企业对环境规制服从程度的差异性,考察企业对环境规制服从程度与污染物排放量的关系,从而核算出企业在各种环境规制服从情景下的颗粒物排放量。本文的主要贡献在于改进污染物排放核算方法。已有方法假设企业完全服从环境规制,在治污技术前沿面上排污,而本研究放松该假设,认为企业对环境规制的服从程度存在差异性,创造性地引入企业违法排污比例这一参数来度量企业对环境规制服从程度的差异,从而得到更符合现实的排放量估算结果。本文研究对于完善污染物排放核算方法、精确识别京津冀工业颗粒物排放源、制定富有成效的大气污染治理对策,具有重要的理论和实践意义。

## 二、考虑违法排污行为的污染物排放量核算方法

### (一) 污染物产生量与最小排放量

假设某一经济体有 $n$ 个环境规制服从程度存在差异的企业,排放一种污染物。<sup>①</sup>令 $e$ 表示企业污染物排放量, $q$ 为企业产量。该经济体在 $t$ 时期的总产量为 $Q_t$ ,该种污染物排放总量为 $E_t$ 。

令 $\zeta_{i,t}^*$ 表示企业在 $t$ 时期单位产量产生的污染物,简称为产污系数,反映了企业在没有采取任何污染治理措施之前的污染物产生状况,这是由企业所加工的原材料和其生产工艺所决定的,污染物产生总量为 $G_t$ ;令 $\lambda_{i,t}^*$ 表示企业在 $t$ 时期所采取污染治理措施后单位产量排放的污染物,这是由污染治理设施的技术工艺所决定的最小排污水平,反映了污染治理设备对污染物的处理能力。这是以往研究文献所采用的排污系数,简称最低排放系数,从而得到排污技术所允许的最小排放量 $E_{t,min}$ 。污染物产生量和最小排放量分别为:

$$G_t = \sum_{i=1}^n q_{i,t} \times \zeta_{i,t}^* \quad (1)$$

$$E_{t,min} = \sum_{i=1}^n q_{i,t} \times \lambda_{i,t}^* \quad (2)$$

<sup>①</sup> 为简化行文起见,假设排放1种污染物。该假设可以放松为多种污染物,不影响结论。

## (二) 污染物实际排放量

令  $\lambda_{i,t}$  代表企业  $i$  在  $t$  时期生产单位产量的实际排污量，简称实际排污系数，反映了企业对环境规制的服从程度， $\lambda_{i,t} \in [\lambda_{i,t}^*, \zeta_{i,t}^*]$ 。上述原理可用公式表示为：

$$E_t = \sum_{i=1}^n e_{i,t} = \sum_{i=1}^n q_{i,t} \times \lambda_{i,t} \quad (3)$$

可见，实际排放量与企业生产规模  $q_{i,t}$  成正向关系，与技术进步 ( $\zeta_{i,t}^*$ 、 $\lambda_{i,t}^*$ ) 成反向关系。企业对环境规制服从程度越高， $\lambda_{i,t}$  越接近最低排污系数  $\lambda_{i,t}^*$ 。当企业完全服从环境规制，即  $\lambda_{i,t} = \lambda_{i,t}^*$  时，经济体污染物实际排放量为最小排放量。企业对环境规制服从程度越低， $\lambda_{i,t}$  越接近产污系数  $\zeta_{i,t}^*$ 。当企业完全没有服从环境规制，即  $\lambda_{i,t} = \zeta_{i,t}^*$  时，经济体污染物实际排放量等于污染物产生量。

## (三) 引入违法排污比例的污染物实际排放量

作为研究者，难以确切了解企业的实际排污系数，甚至环境监测部门也不可能准确判定所有企业的实际排污系数，但所有企业环境行为可以简化为两类，一类是服从环境规制而违法排污的行为，假定其所占比例为  $\rho$ ；另一类是严格服从环境规制的行为，所占比例为  $(1 - \rho)$ 。这些比例既可以针对每个企业的不同环境行为，也可以针对企业整体的不同行为。那么，该经济体污染物实际排放量为：

$$\begin{aligned} E_t &= \sum_{i=1}^n q_{i,t} \times \lambda_{i,t}^* \times (1 - \rho_t) + \sum_{i=1}^n q_{i,t} \times \zeta_{i,t}^* \times \rho_t \\ &= \sum_{i=1}^n q_{i,t} \times \lambda_{i,t}^* + \sum_{i=1}^n q_{i,t} \times (\zeta_{i,t}^* - \lambda_{i,t}^*) \times \rho_t \\ &= E_{t,min} + E_{t,dis} \end{aligned} \quad (4)$$

这就是说，在企业对环境规制的服从状况存在差异的情况下，污染物实际排放量是在最小排污量 ( $E_{t,min}$ ) 的基础上，加上企业不服从环境规制从而超标排放的贡献，简称超标排放量 ( $E_{t,dis}$ )。其中， $\rho$  越低，说明企业服从环境规制程度越高，超标排放量越低。当  $\rho = 0$  时，说明企业完全服从环境规制，经济体实现污染物最低排放量；当  $\rho = 1$  时，说明企业完全不服从环境规制，超标排放量最高，污染物实际排放量等于产生量。

## 三、变量界定与数据说明

### (一) 京津冀地区概况

京津冀地处华北平原，西为太行山，北为燕山，燕山以北为张北高原。京、津两市被河北省环绕，包括河北省下辖 11 个地级市在内，京津冀共有 13 个地级及以上城市。京津冀三地土地面积分别为 1.68 万  $\text{km}^2$ 、1.19 万  $\text{km}^2$  和 18.88 万  $\text{km}^2$ ，合计

21.75 万 km<sup>2</sup>，占全国土地面积的 2.24%。2015 年末常住人口 1.11 亿人，占全国总人口的 8.11%，GDP 合计 6.94 万亿元，占全国的 9.60%。

## (二) 大气污染行业及其产品产量

本文所指颗粒物是烟尘和粉尘总称，也称为总悬浮颗粒物（Total Suspended Particulate, TSP）或一次颗粒物。根据 2013 年《大气污染防治行动计划》，涉及工业颗粒物排放的行业主要有火电厂、金属冶炼、石油冶炼、化工、建材等行业。由于火电厂排放 PM<sub>2.5</sub> 较少，<sup>①</sup> 根据京津冀地区主要大气污染行业产品产量和在全国所处地位，选取焦炭、水泥、平板玻璃和主要钢铁产品（烧结矿、球团矿、生铁和粗钢）作为估算对象。

京津冀三地的生铁、粗钢、水泥、平板玻璃和焦炭产量来自历年《中国统计年鉴》。由于烧结矿和球团矿只有全国产量，因而各地产量只能推算。假设各省市烧结矿和球团矿产量在全国的比重与生铁比重相同，<sup>②</sup> 京津冀三地的烧结矿和球团矿产量根据全国烧结矿、球团矿产量和京津冀生铁产量比重来推算。全国烧结矿和球团矿产量来自历年《中国钢铁工业年鉴》。

自 2000 年以来，京津冀地区水泥、粗钢等工业品产量大幅增长。2015 年，水泥产量比 2000 年增长了 80.63%，粗钢产量增长了 774.48%。由于北京市首钢等重污染企业“退城搬迁”，京津冀工业空间格局发生了显著的变化。2000 年，北京市粗钢产量 803.42 万吨，居京津冀 13 个城市首位，高于唐山和邯郸产量之和。根据全国经济普查资料，2004 年唐山和邯郸粗钢产量都超过了北京市，2013 年石家庄和承德的钢铁产量也超过了北京曾经的产量高峰（见表 1）。也就是说，京津冀地区钢铁等大气污染行业在高速增长的同时，在空间上也经历了北京收缩而周边城市扩张的重新布局过程。

京津冀大城市污染企业“退城搬迁”也改变了企业城乡分布的空间格局，将更多的污染源从城区转移到环境规制薄弱的农村地区 and 级别较低的产业集聚区（李玉红，2018）。

表 1 京津冀地区“2+11”城市粗钢和水泥产量分布及变化

地区	粗钢(万吨)		增速(%)	水泥(万吨)		增速(%)
	2004 年	2013 年		2004 年	2013 年	
北京市	826.06	2.30	-99.72	1128.00	901.54	-20.08
天津市	741.99	2289.50	208.56	537.00	951.90	77.26
河北省	5702.48	18849.62	230.55	7110.59	12676.24	78.27

① 根据 Cao 等（2007）对中国的测算，火电厂排放仅占细颗粒物全部来源的 1.4%。

② 烧结矿和球团矿都是生铁冶炼的中间产品，且运输成本较高，各省之间进行长距离运输的规模较小，因而根据生铁产量比重推算中间产品比重的假设基本可靠。

续表

地区	粗钢(万吨)		增速(%)	水泥(万吨)		增速(%)
	2004年	2013年		2004年	2013年	
石家庄	351.55	1367.41	288.97	1709.22	3886.29	127.37
唐山	2927.04	8299.35	183.54	2696.53	3716.88	37.84
秦皇岛	79.50	697.84	777.79	376.15	428.04	13.80
邯郸	1227.25	4484.61	265.42	713.46	691.98	-3.01
邢台	394.17	710.47	80.24	517.15	1097.99	112.32
保定	32.03	109.43	241.65	357.07	735.85	106.08
张家口	346.47	620.42	79.07	142.60	472.24	231.16
承德	272.29	1218.34	347.44	194.39	417.88	114.97
沧州	24.57	818.79	3232.48	76.05	209.66	175.69
廊坊	47.61	522.52	997.50	228.22	749.24	228.30
衡水	0.00	0.44	—	99.75	270.19	170.87

资料来源：相关年份《中国统计年鉴》《河北省经济普查年鉴》。

### (三) 生产技术和污染治理水平的确定

根据第一次全国污染源普查资料编纂委员会编制的《污染源普查产排污系数手册》(以下简称《手册》),可以查到各生产工艺、各种规模等级的产污系数和排污系数。该《手册》反映了2007年前后存在的各种工业生产工艺和规模等级。一般来说,同一生产工艺有各种不同的规模等级,而规模较大的生产工艺产污系数和排污系数较低。如生铁冶炼的2000m<sup>3</sup>高炉颗粒物(烟尘和工业粉尘)排污系数为0.305kg/t,是350~2000m<sup>3</sup>高炉排污系数的33%(见表2)。为避免污染物排放量被高估,除水泥外,本文假设企业都采用《手册》较高水平的生产工艺,2013年采用最高一档规模等级,而2004年采用次高一档规模等级。2004年之前水泥行业以立窑为主(雷宇等,2008),而2012年京津冀新型干法水泥工艺产能占87.66%(田刚等,2014),因而水泥采取不同生产工艺。

企业实际生产工艺可能不止一种,然而,与不同生产工艺的产污系数或排污系数的差异相比,同一生产工艺的产污系数与排污系数差别更大,二者相差数十倍甚至上百倍。如2000m<sup>3</sup>冶炼高炉,每冶炼1t生铁产生颗粒物37.63kg,经过末端处理后,颗粒物排放量仅有0.305kg,前者是后者的123倍。

可见,不同生产工艺和规模等级之间的产污系数或排污系数的差异程度较小,而无论何种生产工艺,其产污系数和排污系数之比都比较高。这说明企业是否安装并正常运行污染治理设备对于污染物实际排放量的影响至关重要,其影响程度远远大于不同技术水平之间的差异。



表2 工业有组织排放颗粒物的产污系数与排污系数

产品名称	原料名称	工艺名称	规模等级	产污系数 (kg/t)	排污系数 (kg/t)	产污系数与 排污系数之比
烧结矿	铁矿、石灰、焦粉、煤粉	带式烧结法	>180m <sup>2</sup>	24.74	0.367	67.41
			50~180m <sup>2</sup>	31.753	0.565	56.20
球团矿	铁精矿、膨润土	竖炉法	>8m <sup>2</sup>	9.45	0.295	32.03
			<8m <sup>2</sup>	9.882	0.358	27.60
炼钢生铁	烧结矿、球团矿、焦炭、煤粉	高炉法	>2000m <sup>3</sup>	37.63	0.305	123.38
			350~2000m <sup>3</sup>	49.7	0.931	53.38
粗钢(碳钢)	生铁水、石灰、铁合金	转炉法	>150t	27.8	0.161	172.67
			50~150t	34.2	0.267	128.09
焦炭	炼焦煤	顶装	炭化室≥6m	10.0284	0.5859	17.12
			4.3~6m	10.8271	0.6346	17.06
水泥	钙、硅铝铁制原料	新型干法	≥4000t/d	51.76	0.277	186.86
		立窑	≥100000t/y	63.33	0.687	92.18
平板玻璃	硅砂、油(重油、煤焦油)	浮法	≥600t	1.228	0.065	18.89
			400~600t	1.238	0.066	18.76

注：1. 末端治理技术有两种时，取排污系数较小值；有三种时，取中位值。2. 水泥≥4000t/a生产工艺仅报告工业粉尘产生系数，假设其烟尘全部被捕捉。

资料来源：《污染源普查产排污系数手册》。

在获得主要大气污染行业的产品产量以及每种产品的产排污系数之后，代入公式(4)，通过设定 $\rho$ 的比例，就可以得到主要大气污染行业颗粒物排放量的各种情景值。

## 四、估算结果与讨论

### (一) 工业颗粒物产生量

2013年，京津冀地区主要工业品颗粒物产生量为2717.34万吨，比2004年增长了近1倍（见表3）。在技术水平提高的情况下，尽管工业品产量大幅增长，但是颗粒物产生量仅增长1倍。颗粒物产生量主要来自钢铁和水泥生产，其中，钢铁行业产生量占60%以上，产生量比2004年增长1倍以上。

分地区看，北京市产生量从2004年的172.92万吨降低到2013年的46.72万吨，减少了72.98%；而河北省产生量达到2404.64万吨，比2004年增长了1倍多，占京津冀地区的88.49%。天津市颗粒物产生量为265.98万吨，比2004年增长了153.34%，增速最高。

根据对颗粒物不同粒径质量分布的研究，烧结矿和球团矿颗粒物产生系数中，PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>分别占5%和15%；生铁颗粒物产生系数中，PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>分别占15%和

25%；粗钢生产环节颗粒物产生系数中，PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>分别占50%和70%（汪旭颖等，2016）。水泥行业立窑生产工艺PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>分别占TSP产生量的11%和31%，新型干法分别占18%和42%（雷宇等，2008；王彦超等，2018）。根据这些产生系数和粒径分布比重，2004年京津冀地区钢铁和水泥行业PM<sub>2.5</sub>产生量达250.82万吨，PM<sub>10</sub>产生量为478.07万吨，分别占颗粒物产生量的17.2%和32.9%；2013年京津冀地区钢铁和水泥行业PM<sub>2.5</sub>产生量达567.62万吨，PM<sub>10</sub>为997.17万吨，分别占颗粒物产生量的20.9%和36.7%。

表3 京津冀地区主要工业品颗粒物产生量与最小排放情景

单位：万吨

地区	2004年				2013年			
	北京	天津	河北	合计	北京	天津	河北	合计
产生量								
焦炭	3.92	4.08	21.02	29.02	0	2.61	64.14	66.75
水泥	71.44	34.01	495.59	601.04	46.66	49.27	659.8	755.73
平板玻璃	0.04	0.02	0.22	0.28	0	0.13	0.73	0.86
烧结矿	28.57	17.12	195.07	240.76	0	62.36	479.55	541.91
球团矿	1.29	0.77	8.82	10.88	0	4.64	35.65	40.29
生铁	39.41	23.61	262.59	325.61	0	83.32	640.75	724.07
粗钢	28.25	25.38	192.94	246.57	0.06	63.65	524.02	587.73
合计	172.92	104.99	1176.25	1454.16	46.72	265.98	2404.64	2717.34
最小排放情景								
焦炭	0.23	0.24	1.23	1.70	0	0.15	3.75	3.90
水泥	0.77	0.37	5.38	6.52	0.25	0.26	3.53	4.04
平板玻璃	0	0	0.01	0.01	0	0.01	0.04	0.05
烧结矿	0.51	0.3	3.47	4.28	0	0.93	7.11	8.04
球团矿	0.05	0.03	0.32	0.40	0	0.14	1.11	1.25
生铁	0.74	0.44	4.92	6.10	0	0.68	5.19	5.87
粗钢	0.22	0.2	1.51	1.93	0	0.37	3.03	3.40

资料来源：作者计算得到。

## （二）最小排放情景（ $\rho=0$ ）

2013年，京津冀地区主要工业品颗粒物最小排放量，也就是企业违法排污比例 $\rho=0$ 时，颗粒物排放量仅有26.55万吨。这是生产技术和污染治理技术所能允许的最小排放值。分地区看，2013年北京市基本实现零排放，天津市排放2.54万吨，河北



省排放 23.76 万吨，占京津冀的 89.50%，比 2004 年提高了 9 个百分点。河北省是京津冀颗粒物排放的主要贡献者，而且所占比重越来越高。

可见，如果企业全部服从环境规制，2013 年工业颗粒物排放量仅为产生量的 0.98%，2004 年为 1.44%，说明污染治理技术进步对于降低污染物排放量具有重要作用。水泥和生铁生产环节的最小排放量减少，说明技术进步效果超过了产量增加效应。然而，即便如此，2013 年工业颗粒物最小排放量比 2004 年增长 26.79%。总体来看，即使在污染治理技术提高的情况下，由于工业产量增加幅度更大，京津冀工业颗粒物最小排放量呈增长趋势。

### (三) 超标排放情景 ( $\rho > 0$ )

企业违法排污比例  $\rho$  取 0.05、0.10 等值，可计算出京津冀地区主要工业品颗粒物排放总量情景，见图 1。2013 年，当  $\rho = 0.05$  时，工业颗粒物排放量为 161.10 万吨，细颗粒物排放量为 33.67 万吨； $\rho = 0.15$  时，工业颗粒物排放量达到 430.18 万吨，细颗粒物排放量达到 89.91 万吨； $\rho = 0.20$  时，工业颗粒物排放量攀升至 564.72 万吨，细颗粒物排放量达到 118.03 万吨。 $\rho = 1$  时，也就是企业全部违法排污时，工业颗粒物排放量相当于颗粒物产生量，达到 2717.34 万吨。

显然，随着企业违法排污比例的提高，颗粒物排放量急剧增长。2013 年，企业违法排污比例每增加 1 个百分点，工业颗粒物排放量增加 27 万吨，细颗粒物排放量增加 5.55 万吨。也就是说，企业违法排污比例每变化 1 个百分点，超标排放量就增加 27 万吨，相当于最小排放量。

与 2004 年相比，2013 年工业颗粒物排放量随着企业违法排污比例变化而变化的幅度更大，超标排放量增加量相当于 2004 年的 2 倍。也就是说，企业违法排污每提高 1 个百分点，2013 年超标排放量是 2004 年的 2 倍。可见，产量增加导致的颗粒物排放量增加效果大大抵消了技术进步带来的颗粒物排放量降低的效果。

图 1 中有 A、B 两点，其中，A 点处于工业产量较低水平，而 B 点处于工业产量较高水平。要实现颗粒物排放量的减少，除了技术进步的作用，另一条途径就是提高对工业企业的环境监管，降低企业违法排污比例。通过减少违法排污行为降低颗粒物实际排放量。这可看作是企业尚未达到最低排放量之前，通过加强环境规制而获得的红利。

### (四) 对违法排污比例 ( $\rho$ ) 的讨论

在现实世界， $\rho$  既不可能为 0，也不可能是 1，它完全取决于地方环保机构在环境保护方面的执行力。环保执行力存在较大的地域差异。在北京等大城市城区， $\rho$  较低，而且随着环境监管的加强有下降趋势；但是河北省各地级市及各县域在经济发展水平相对落后情况下，地方政府将工业发展摆在优先地位， $\rho$  可能较高。在“退城搬迁”的背景下，北京等大城市城区的污染企业从环保执行力强的地区迁入环保执行力弱的地区。在技术水平保持不变的情况下，区域污染物排放量必然增加。

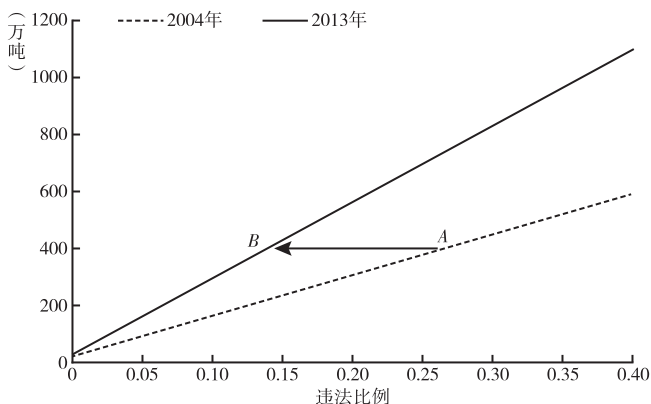


图1 不同环境规制服从情景下工业一次颗粒物排放量

资料来源：作者绘制。

$\rho$  的大小也与企业规模有关。较大规模企业会列入各种行政级别的重点排污单位。如，占排污量 85% 的企业为重点调查企业，<sup>①</sup> 须主动上报其排污情况（Self-reporting），其中，约有 1 万家国家重点监控企业须安装污染物自动监测（Automatic Reporting）设备，此外还有省级监控企业、地市级重点排污单位。此外，环境规制程度也与行业有关系，比如钢铁、火电等行业企业规模较大，易于监管；而非金属矿物制品行业小企业众多，不易监管。

总之，违法排污比例与企业所在地的环境执法程度、企业规模与企业所在行业有密切关系。从现实数据来看，根据中国第一次污染源普查资料，2007 年中国全部工业源烟粉尘排放量为 1747 万吨，其中，年度调查得到的工业排放量为 1470 万吨，占普查资料的 84.15%，说明至少约有 15% 的排放量被年度调查所漏报。另外，也可以这样理解，与那些不报告排放量的 15% 非重点调查企业相比，重点企业受到相对较高程度的环境监管，可认为其服从环境规制。综合判断， $\rho = 0.15$  是一个值得关注的比例。总之，实际的  $\rho$  可能比 0.15 要高，且随时间、行业和地区不同而有一定差异。在没有更为准确的  $\rho$  值情况下，0.15 具有一定的参考价值，是一个相对合理而又保守的参考值。

在  $\rho = 0.15$  情景下，2013 年京津冀工业颗粒物排放量为 430 万吨，其中，可吸入颗粒物为 141 万吨，细颗粒物为 90 万吨。

2013—2017 年，中国实施《大气污染防治行动计划》（以下简称“大气十条”），京津冀地区大气质量得到明显改善。2017 年，北京、天津和石家庄细颗粒物浓度分别较 2013 年下降了 34.83%、35.42% 和 44.16%，平均下降 39.23%。然而，同期京

<sup>①</sup> 中国工业排污统计采用重点调查制度，即对占排污量 85% 的企业进行重点调查，而其他 15% 的非重点调查企业则根据其产量进行估算。

津冀主要工业品产量降幅并不大,除了水泥产量下降了32.07%,主要污染大户钢铁行业产量基本保持不变,生铁产量还略有增加(见表4)。实际上,“大气十条”实施重点在于依据现有法律对企业进行强化监督。2017年4月,环保部从全国抽调5600名环境执法骨干人员,组织对京津冀及周边地区“2+26”城市开展为期一年的大气污染防治强化督查。截至2017年底,督查组共对18.12万个企业点位进行了检查,发现问题3.43万个,占企业点位的18.93%(张航,2018)。由于环境监管明显增强,企业违法排污比例减小,从而在产量变动不大的情况下,环境空气质量显著改善。

表4 2013年与2017年京津冀地区主要工业品产量比较

年份	焦炭(万吨)	水泥(万吨)	平板玻璃 (万重量箱)	生铁(万吨)	粗钢(万吨)	细颗粒物浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
2013	6656.01	14600.82	13973.5	19241.75	21141.42	113.0
2017	4971.55	9918.44	16999.81	19635.05	20934.02	68.7
变化率(%)	-25.31	-32.07	21.66	2.04	-0.98	-39.2

资料来源:相关年份《中国统计年鉴》。

#### (五) 与其他研究成果的比较

本文引入企业违法排污比例来估算工业颗粒物排放量,估算结果具有较强的解释力。一方面,本文使用最小排放量概念与其他文献的行业颗粒物排放清单相当,即在全企业都遵守环境规制情况下,本文的估计结果与清单研究结果近似。伯鑫等(2017)估算2012年京津冀地区主要钢铁企业烟粉尘有组织排放量为20.48万吨,与本文估算的钢铁行业颗粒物最小排放量相差仅2万吨。

另一方面,引入违法排污比例得到的工业颗粒物排放量能够更好地解释京津冀区域灰霾污染加重的现实。据统计,2013年京津冀工业颗粒物排放量仅有128万吨(全社会排放量为146万吨),低于2000年工业178万吨的排放量。显然,这难以说明区域灰霾污染加重的事实。实际上,Cao等(2011)估计2007年京津冀全社会 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量达到148.5万吨,而环保统计2007年全社会颗粒物排放量仅有131万吨。总体来看,本文估算2013年工业颗粒物排放量430万吨, $\text{PM}_{2.5}$ 为90万吨,这个结果相对合理。与其他研究成果的比较结果如表5所示。

表5 与其他研究成果的比较

研究成果	估算年份	估算口径	地区	总悬浮颗粒物 (万吨)	$\text{PM}_{2.5}$ 排放量 (万吨)
本文	2013	大气污染行业(有组织)	京津冀	430	90
Cao等(2011)	2007	全口径	全国		1321.2
		全口径	京津冀		148.5

续表

研究成果	估算年份	估算口径	地区	总悬浮颗粒物 (万吨)	PM <sub>2.5</sub> 排放量 (万吨)
Zhang 等(2009)	2006	不包括生物质燃烧	全国		1326.6
		不包括生物质燃烧	京津冀		118.0
张强等(2006)	2001	全口径	全国	2651	1210
汪旭颖等(2016)	2012	钢铁(包括无组织)	全国	561	116
伯鑫等(2017)	2012	钢铁(有组织)	京津冀	20.48	13.32
段文娇等(2018)	2015	钢铁、炼焦(包括无组织)	京津冀	79.19	38.68
薛亦峰等(2014)	2010	水泥(有组织)	北京	0.29	
王彦超等(2018)	2016	水泥	京津冀及周边	17.9	4.1

资料来源：作者整理得到。

## 五、结论与政策含义

### (一) 结论

本文从企业对环境规制服从程度存在差异性的现实出发，创造性地将企业违法排污比例纳入颗粒物排放框架，估计了2004年和2013年京津冀地区主要大气污染行业颗粒物排放量。

(1) 自2000年以来，京津冀地区以钢铁、建材为代表的大气污染行业迅猛发展，工业布局经历了北京收缩而周边城市扩张的空间重组过程。污染企业“退城搬迁”也改变了企业城乡空间格局。污染企业从环保执行力强的大城市城区转移到环保执行力弱的地区，有可能增加区域污染物排放量。

(2) 2013年，京津冀地区工业颗粒物产生量2717.34万吨，比2004年增长了86.87%；最低排放量为26.55万吨，比2004年增长了26.79%。也就是说，如果企业全部服从环境规制，2013年工业颗粒物排放量仅为产生量的0.98%。工业颗粒物产生量与最低排放量相差百倍，说明企业服从环境规制、进行污染治理对于降低污染物排放量至关重要。

分区域看，北京市主要工业品颗粒物产生量和最低排放量都显著减少。河北省继续保持排放首位，最低排放量占京津冀地区的89.50%，比2004年提高了9个百分点。分行业看，钢铁、水泥和焦炭等行业是颗粒物产生量和最低排放量的主要来源。

(3) 对企业违法排污的情景分析显示，随着企业违法排污比例的提高，颗粒物超标排放量急剧上升。违法排污比例每增加1个百分点，2013年工业颗粒物超标排

放量增加 27 万吨, 相当于当年的最小排放量。在企业违法排污比例为 15% 的情景下, 京津冀工业颗粒物排放量为 430 万吨,  $PM_{2.5}$  排放量 90 为万吨。

## (二) 政策含义

经过“大气十条”治理, 京津冀各城市  $PM_{2.5}$  浓度有所下降, 但区域灰霾污染问题依然严重, 因而准确识别京津冀细颗粒物排放的来源具有重要意义。现代工业生产工艺的产污系数和排污系数相差几十倍甚至上百倍, 因而企业是否治理污染、是否达标排放对于控制工业颗粒物排放量至关重要。

因而, 京津冀  $PM_{2.5}$  污染的治理, 一方面, 须提高企业污染治理技术水平; 另一方面, 可挖掘环境规制红利, 加强对企业违法排污行为的监管, 通过减少企业违法排污行为降低颗粒物实际排放量。具体包括以下政策举措。

第一, 从企业规模来说, 加强对中小型企业的环境监管。环境政策关注点通常是狠抓大企业而忽视小企业。小企业虽然产量较少, 但如果超标排放, 则排放量会超过技术先进的大企业。这一策略已在京津冀及周边“散乱污”企业整治中初见成效。值得注意的是, 中小企业不能采取“一刀切”的淘汰政策, 而应根据其实际排污效果, 不达标企业应该退出, 达标的企业强化监管。淘汰那些限期不能达标的企业。

第二, 从行业来看, 加强对钢铁、水泥和焦炭等行业的监管。京津冀地区水泥、陶瓷、砖瓦等建材企业数量多、规模大小不一、布局分散、监管程度较低, 因而, 今后应加强对小企业密集行业的环境执法。

第三, 从空间上看, 控制重点是环境规制薄弱、环境执法水平较低的地区, 如农村地区和级别较低的工业集聚区。北京等大城市城区环境规制程度最为严格, 应将环境监管重点向工业集聚的河北省地级市、县域和乡镇倾斜。“退城搬迁”的污染企业从城镇建成区搬迁之后, 对迁入地的环境监管不能放松。

## 参考文献

包群、邵敏、杨大利 (2013): 《环境管制抑制了污染排放吗?》, 《经济研究》第 12 期, 第 42 ~ 54 页。

伯鑫、徐峻、杜晓惠等 (2017): 《京津冀地区钢铁企业大气污染影响评估》, 《中国环境科学》第 5 期, 第 1684 ~ 1692 页。

第一次全国污染源普查资料编纂委员会编 (2011): 《污染源普查产排污系数手册》, 北京: 中国环境科学出版社。

段文娇、郎建奎、程水源等 (2018): 《京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对  $PM_{2.5}$  影响》, 《环境科学》第 4 期, 第 1445 ~ 1454 页。

何燕 (2010): 《析中国环境执法的现状与完善》, 《中国人口·资源与环境》第 5 期, 第 146 ~ 150 页。

环境保护部办公厅 (2016): 《关于通报钢铁行业环境保护专项执法检查情况的函》, [http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201610/t20161009\\_365150.htm](http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201610/t20161009_365150.htm) [2018 - 10 - 19]。

环境保护部办公厅 (2018): 《关于砖瓦行业环保专项执法检查开展情况的通报》, [http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201803/t20180301\\_365150.htm](http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201803/t20180301_365150.htm)

www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201801/t20180115\_429715.htm [2018-10-19]。

雷宇、贺克斌、张强等 (2008):《基于技术的水泥工业大气颗粒物排放清单》,《环境科学》第8期,第2366~2371页。

李玉红 (2018):《中国工业污染的空间分布与治理研究》,《经济学家》第9期,第59~65页。

刘海猛、方创琳、黄解军等 (2018):《京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析》,《地理学报》第1期,第177~191页。

彭向刚、向俊杰 (2013):《论生态文明建设视野下农村环保政策的执行力——对“癌症村”现象的反思》,《中国人口·资源与环境》第7期,第13~21页。

秦虎、张建宇 (2006):《中美环境执法与经济处罚的比较分析》,《环境科学研究》第2期,第75~81页。

田刚、王凡、束韞等 (2014):《京津冀水泥工业大气污染状况研究》,《中国水泥》第6期,第68~70页。

汪旭颖、燕丽、雷宇等 (2016):《我国钢铁工业一次颗粒物排放量估算》,《环境科学学报》第8期,第3033~3039页。

王桂林、杨昆、杨扬 (2017):《京津冀地区不透水表面扩张对PM<sub>2.5</sub>污染的影响研究》,《中国环境科学》第7期,第2470~2481页。

王彦超、蒋春来、贺晋瑜等 (2018):《京津冀及周边地区水泥工业大气污染控制分析》,《中国环境科学》第10期,第3683~3688页。

王跃思、姚利、刘子锐等 (2013):《京津冀大气霾污染及控制策略思考》,《中国科学院院刊》第3期,第353~363页。

薛亦峰、曲松、闫静等 (2014):《北京市水泥工业大气污染物排放清单及污染特征》,《环境科学与技术》第1期,第201~204页。

杨朝飞 (2012):《环境污染损害鉴定与评估是根治“违法成本低和守法成本高”顽疾的重要举措》,《环境保护》第5期,第18~24页。

张航 (2018):《整治“散乱污”6万家,督办环境问题2万个,“史上最强”环保督查什么样?》,《北京晚报》1月18日。

张强、Z. Klimont、D. G. Streets等 (2006):《中国人为源颗粒物排放模型及2001年排放清单估算》,《自然科学进展》第16期,第223~231页。

周曙东、欧阳纬清、葛继红 (2017):《京津冀PM<sub>2.5</sub>的主要影响因素及内在关系研究》,《中国人口·资源与环境》第4期,第102~109页。

Cao, G. L., X. Y. Zhang and S. L. Gong, et al. (2011), “Emission Inventories of Primary Particles and Pollutant Gases for China”, *Chinese Science Bulletin*, 56 (8), pp. 781–788.

Shimshack, J. P. (2014), “The Economics of Environmental Monitoring and Enforcement”, *Annual Review of Resource Economics*, (6), pp. 339–360.

Tilt, B. (2007), “The Political Ecology of Pollution Enforcement in China: A Case from Sichuan’s Rural Industrial Sector”, *The China Quarterly*, 192, pp. 915–932.

Zhang, Q., D. G. Streets and G. R. Carmichael, et al. (2009), “Asian Emissions in 2006 for the NASA INTEX-B Mission”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, (9), pp. 4081–4139.



# On Industrial Particle Emission in Beijing-Tianjin-Hebei from Perspective of Pollution Violation

LI Yu-hong<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>2</sup>

(1. Institute of Quantitative and Technical Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100732, China; 2. University of International Business and Economics, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Industrial primary particle is one of main contributors to fine particle ( $PM_{2.5}$ ) pollution. Current researches usually assume that polluters obey environmental regulation completely, focus on abatement technology of firms and ignore pollution violation behavior. On the background of fast growth of industrial activities and aggravating fine particles pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region, this paper employs scenario method and takes into account of differences in firms' compliance with environmental regulation. It originally introduces pollution violation parameter into a framework of calculating industrial pollutant emission. It estimates the generating volume, minimum emission and emissions of primary particles and  $PM_{2.5}$  in the scenarios of pollution violation from industrial activities in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2004 and 2013. It finds that (1) primary particles generated and minimally emit in year 2013 reach 27 million and 270 thousand tons respectively, and 15 million and 210 thousand tons in year 2004. Industrial particles generated and discharged in Beijing have both decreased obviously while minimum emission from Hebei province accounted 89.5 percent of regional emission, 9 percentage higher than that in 2004. (2) In the scenarios of pollution violation, the emission rises sharply with increase in pollution violation. One percent of pollution violation higher leads to 270 thousand tons of primary particle emission increment. Primary particle and fine particle from industrial discharge gets to 4 million and 1 million separately in the scenario of 15 percent of pollution violation. It suggests that environmental monitoring and enforcement must be strengthened and small enterprises, non-metal mineral manufacturing industries and rural areas where polluters cluster should become policy priorities.

**Key Words:** haze; fine particle ( $PM_{2.5}$ ); emission inventory; environmental enforcement; pollution violation

责任编辑: 周枕戈