

# 造纸企业污染物排放影子价格的估计

## ——基于参数化的方向性距离函数

王 兵 朱晓磊 杜敏哲\*

**摘要:**在我国环境污染日趋严重的态势下,污染物排放交易市场的构建及其交易价格的确定是有效治理污染物排放的关键问题。本文分别运用二次型方向性距离函数和森岛通夫产出替代弹性估算了东莞市35家造纸企业的污染物排放影子价格及其产出替代弹性。研究发现:COD与粉尘的平均影子价格分别为5.70万元/吨和2.88万元/吨,COD的平均影子价格呈现逐年递减的趋势,而粉尘的平均影子价格波动不大;这两种污染物的平均影子价格与其排放强度呈负相关关系,规模越大的企业影子价格越高;COD与粉尘之间具有替代关系,并且粉尘对COD的替代程度逐渐加大。因此,政策制定者在评价一个企业的减排效果时,要充分考虑企业规模及其选择的具体污染物减排策略,避免通过加大排放其他污染物来替代目标污染物减少的可持续发展的减排策略。

**关键词:**影子价格;产出替代弹性;二次型方向性距离函数;造纸企业

### 一、引言

改革开放以来,中国造纸业发展实现了历史性的突破——中国在2011年就已取代美国成为世界造纸产量最大的国家,造纸业的崛起在国民经济发展进程中也处于重要的地位。伴随着对造纸业有效需求的不断增长,其所吸纳的投资额正逐年上升,并已超过文教体育用品

---

\*王兵,暨南大学经济学院,邮政编码:510632,电子邮箱:wblfy@126.com;朱晓磊,暨南大学经济学院,邮政编码:510632,电子邮箱:zzhuxiaolei163@163.com;杜敏哲,暨南大学经济学院,邮政编码:510632,电子邮箱:minzhe\_du@126.com。

本文系国家自然科学基金项目“中国城市水务行业市场化改革和效率评价及提升路径研究”(71473105),国家社会科学基金重点项目“生态补偿导向的环境会计研究”(14AZD068),国家社会科学基金重大项目“雾霾治理与经济发展方式转变机制研究”(14ZDB44)和“党中央治国理政的生态文明制度建设思想研究”(16ZZD049),广东省高等学校珠江学者岗位计划资助项目(2015)和广东科技创新培育计划(攀登计划)“基于产业集聚视角下中国水污染治理研究”(pdjh2017b0070)的阶段性成果。感谢匿名审稿人的宝贵建议,文责自负。

制造业和印刷业的固定资产投资总额之和,成为相关行业重点投资方向<sup>①</sup>。但在其生产过程中产生的诸如化学需氧量(COD)和二氧化硫(SO<sub>2</sub>)等污染物,也随着造纸企业数量的增加和生产规模的扩大而剧增,这就导致环境污染问题日益严峻。国家工信部、科技部和财政部共同制定的《工业清洁生产推行“十二五”规划》,尤其针对造纸等行业,提出实施削减COD的清洁工程,以实现经济的绿色增长和环境保护的协调发展。而环境污染影子价格在环境公共政策的制定和绿色增长核算等领域有着重要的应用(陈诗一,2010),因此,对污染物排放影子价格的测算是本文研究的关键问题。

针对污染物的排放控制与治理,环境税的推行和污染物排放交易市场的构建是解决我国环境污染问题的重要途径之一。现有研究表明,环境污染物排放的影子价格可以作为环境税税率设定和污染物排放交易定价的参考价值(陈诗一,2010)。目前,尤其在中国国内,由于缺少对污染物价格的界定,尚未形成一个完善的交易机制,故如何对污染物进行定价,是本文首先需要解决的最主要问题。区别于具有市场价格的“好”产出,污染物作为一种“坏”产出,因缺乏实际的交易行为,所以并不存在明确的市场价格,而影子价格作为社会成本(或利润)的体现者,可以有效地反映“坏”产出的交易价格,所以对影子价格的测度成为解决污染物排放定价的关键。

随着对污染物排放管制的日趋严格,生产企业不仅仅会考虑污染物排放的交易成本,同时也往往会选择弱管制或者无管制的污染物进行排放以减少生产成本。但是,目前尚没有一个完善的机制来区别和评价企业这样的“投机”行为,而这些行为会直接或间接地导致企业间竞争的不公平和市场秩序的混乱。为此,本文需要厘清企业生产的“好”产出与“坏”产出以及“坏”产出之间的替代弹性,从而识别出企业是否通过控制高成本的污染物排放或转换为低成本的污染物排放来实现污染物管制目标。

针对上述两个需要解决的问题,本文以东莞市35家造纸企业2004–2008年的投入产出数据为样本,试图通过二次型的方向性产出距离函数来估计污染物COD和烟尘的影子价格,并基于森岛托夫产出替代弹性计算“好”“坏”产出以及“坏”产出之间的替代弹性,最后针对环境政策的制定提供若干有价值的建议。

## 二、文献回顾

污染物的边际减排成本反映了污染物的影子价格,一些学者已经对污染物的边际减排成本作了相应的研究。目前用来测算污染物影子价格的模型很多,主要有排放预测与政策分析模型、CGE模型、距离函数模型等。基于边界分析的影子价格定价方法,主要分为参数的和非参数的形式,前者主要集中于确定性模型(计量模型)和随机性模型(SFA),而后者则主要使

<sup>①</sup>2016年8月,全国造纸及纸制品业完成投资累计将近2000亿元,实现同比增长约7%。

用的是DEA方法。在早期对影子价格的研究中,主要基于Shephard(谢泼德)距离函数的测度,距离函数模型只需要实际的污染排放量,而不用考虑是否存在监管,也不需要投入产出的价格信息,更重要的是,可以在产出距离函数与收益函数的对偶关系中推导出污染物的影子价格,使得影子价格具有更明确的经济含义。基于距离函数的以上优点,该方法被广泛的运用到影子价格的研究中。Färe等(1993)运用此方法求得了美国密歇根州和威斯康星州1976年30个造纸厂四种污染物的影子价格。Hetemaki(1994)、Coggins和Swinton(1996)运用相同的方法分别估计了芬兰造纸行业和火力发电厂的污染物边际减排成本。Kwon和Yun(1999)估算了1990-1995年韩国各个省份火力发电企业的污染物影子价格,结果显示各企业间的边际减排成本相差较大,影子价格呈现逐年下降趋势。Martínez等(2001)估计了1995年西班牙18个瓷板生产企业两种污染物的影子价格,结果显示,污染物排放量越大的企业,污染物的影子价格越低。Murty和Kumar(2002)估算了1994-1995年印度60家水污染企业的污染物影子价格。Park和Lim(2009)估算了韩国发电企业的SO<sub>2</sub>影子价格,并在此基础上比较直接减少SO<sub>2</sub>排放与购买排污权这两种选择的成本效率,为韩国发电企业以最有效率的方式应对即将到来的温室气体管制提供指导。

不过,产出距离函数是要在投入固定的情况下通过产出的扩张来达到技术有效,而同比例扩张“好”“坏”产出对福利的影响并不确定。基于投入的距离函数来估计污染企业的影子价格虽能避免以上问题,但是它只能固定所有产出不变,通过减少投入来达到技术有效,这并不符合政策制定者的期望——在经济增长的情况下,污染物应该得到有效地遏制。Chambers等(1996)提出了一种新的函数,即方向性距离函数,通过同时对投入和产出调整不同的方向,从而摆脱了角度性的约束,而Chung等(1997)首次将其应用于测度包含有“坏”产出的情况。方向性产出距离函数允许产出的非同比例变化,一种产出增加的同时另一产出减少,其对福利的影响很明确,又能满足现阶段的环境管制目标。Lee等(2002)基于非参数方向性距离函数估算了韩国电力企业污染物的影子价格,得出把企业无效率考虑到影子价格的测算中会比在完全效率假设下得出的影子价格低,而前者更接近真实的影子价格。Lee等(2014)同样利用DEA和方向性距离函数法对韩国23家发电企业的CO<sub>2</sub>排放的影子价格进行测算。结合非参数DEA和方向性距离函数对美国电力企业污染物排放影子价格进行测算分析的研究也有不少(如Färe et al., 2005; Lee & Zhou, 2015; Feng et al., 2017)。Färe等(2005)使用该方法估算了美国209家发电厂的SO<sub>2</sub>影子价格,得出影子价格在1993-1997年呈现逐年递增的趋势。Lee和Zhou(2015)构造了方向性影子价格,并对美国1990-2010年的火力发电企业的CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>排放的影子价格进行测度。对于发展中国家污染物排放成本的研究,Murty等(2007)则运用方向性距离函数测算了印度5个发电厂的污染物影子价格,并将估算结果与当时已有的相关文献的结论作了比较。

近年来,国内陆续也有部分学者开始研究污染物的影子价格。涂正革(2010)采用非参数方法构建方向性环境生产前沿函数模型,衡量各地区工业二氧化硫排放变化对产出的边际净效应以及二氧化硫排放的影子价格。陈诗一(2010)分别基于超越对数函数参数化的方向性距离函数以及非参数方向性距离函数来估算CO<sub>2</sub>的影子价格,讨论了影子价格在环境税和污染物排放权交易中的应用,并基于计算出来的影子价格算出相应的绿色生产率指数。袁鹏和程施(2011)采用我国284个地级及以上城市的工业加总投入产出数据,基于二次型方向性距离函数估计出工业废水、SO<sub>2</sub>和烟尘这三种污染物的影子价格,结果表明,SO<sub>2</sub>的边际减排成本比同期SO<sub>2</sub>排污权交易价格高出许多,过低的排污权交易价格影响了排污权交易市场的正常运作。刘明磊等(2011)使用非参数方向性距离函数估算了2005–2007年我国省级CO<sub>2</sub>的影子价格,结果表明,CO<sub>2</sub>的影子价格与地区CO<sub>2</sub>排放水平呈现负相关关系,并表现出逐年递增的趋势。Wang等(2011)利用非参数方向性距离函数估算了“好”产出增加、“坏”产出减少以及“好”产出增加、“坏”产出不变两种环境管制方案下的CO<sub>2</sub>的边际减排成本。黄文若和魏楚(2012)利用环境方向性距离函数估计了中国29个省1995–2007年间的二氧化碳影子价格。万伦来和陶建国(2012)年采用非参数的方向性距离函数测度了安徽2009年38家煤炭开采和洗选企业的废水、废气和固体废物的影子价格。为了考虑发电企业之间的异质性问题,Du等(2016)则运用参数共同边界方法测算了中国火力发电企业的CO<sub>2</sub>排放的影子价格。魏楚(2014)利用参数化的方向距离函数模型对中国104个地级市2001–2008年的CO<sub>2</sub>边际减排成本以及影响因素进行定量分析。Xie等(2016)运用参数化的方向性距离函数测算了中国1998–2011年期间的工业SO<sub>2</sub>排放的影子价格。

经过对方向性距离函数进行参数化,可以将生产边界用特定的生产函数形式表示,通过微分可求得“坏”产出的影子价格(魏楚,2014),而非参数方法难以通过求导来估计出“坏”产出的影子价格(Hailu & Veeman, 2000)。此外,为了研究“好”产出和“坏”产出的影子价格如何随着污染物排放强度变化而变化,Färe et al.(2005)在Blackorby和Russell(1989)构建的森岛通夫替代弹性(Morishima elasticity of substitution)的基础上,利用二次型方向性距离函数估计出电力部门的发电量与SO<sub>2</sub>之间的替代弹性。采用同样的方法,Kumar和Managi(2011)测算出印度工业的“好”产出与各种水污染物(如COD、BOD等)以及各种水污染物之间的替代弹性。Bonilla等(2017)通过估算出瑞典在2001–2009年间热电厂的有用能量与CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>以及CO<sub>2</sub>与NO<sub>x</sub>之间的森岛通夫产出替代弹性来研究污染物的协同减排问题。

综上所述,由于国内企业层面的污染数据难以获取,当前研究多集中于宏观层面,鲜有关于造纸企业污染物排放的研究。目前关于国内污染物排放影子价格测算的大部分文献是采用宏观加总数据(陈诗一,2011;袁鹏、程施,2011;刘明磊等,2011;Xie et al.,2016),而总量数据中往往包含了许多污染排放量少,甚至无污染排放的企业数据。根据目前研究得出的较为一致



的“污染排放越少,影子价格越高”的结论,这些污染排放少的企业会高估算出的整体污染物影子价格,造成估算结果的不准确,使得研究的结论缺乏直接政策指导意义。因此,本文拟在以下两个方面进行拓展研究:第一,本文利用东莞市35家造纸企业2004-2008年投入产出的微观数据,将参数化的二次型方向性距离函数运用到我国微观的造纸企业污染物排放的影子价格的测算中,进一步丰富国内对微观企业污染物排放影子价格的研究,尤其是针对造纸企业的研究;第二,根据森岛通夫产出替代弹性计算“好”“坏”产出以及“坏”产出之间的替代弹性,有助于企业对具体污染物排放的控制与治理,并为相关政府部门指导环境政策的制定及其评价提供依据。

### 三、研究方法

造纸企业在其联合生产过程中,往往会生产出企业所期望的产品及其衍生的污染物等副产品。假设每一个造纸企业使用  $N$  种投入  $x=(x_1, \dots, x_n) \in R_N^+$ , 生产出  $M$  种“好”产出  $y=(y_1, \dots, y_m) \in R_M^+$ , 以及  $I$  种“坏”产出  $b=(b_1, \dots, b_l) \in R_I^+$ 。造纸企业的生产活动可通过生产可行性集定义如下:

$$P(x)=\{(y, b): x \text{ 可以生产 } (y, b)\}, x \in R_N^+ \quad (1)$$

根据 Chung 等(1997)的研究,在生产理论中,生产可能性集是一个有界集和闭集,且投入和“好”产出具有强可处置性。此外,根据“好”产出和“坏”产出的联合生产关系,需要增加两个额外的公理:

(1)零结合公理: 若  $(y, b) \in P(x)$  且  $b=0$ , 则  $y=0$ 。

(2)“坏”产出弱可处置性公理: 若  $(y, b) \in P(x)$  且  $0 \leq \theta \leq 1$ , 则  $(\theta y, \theta b) \in P(x)$ 。

第一个公理意味着如果没有“坏”产出,就没有“好”产出,有“好”产出就一定有“坏”产出,两者是同时生产的。第二个公理意味着“坏”产出的减少是有成本的,即在给定的投入水平下,减少“坏”产出需要占用生产“好”产出的投入,使得“好”产出也必须减少。

#### (一)方向性距离函数

以上对生产可能性集的描述虽然有助于理解环境生产技术的概念,但是对于求解影子价格并无帮助。因此本文引入方向性产出距离函数来模型化此生产过程。方向性产出距离函数是谢泼德产出距离函数的一般化,它可以完整地描述该生产过程的全部特征,继承了生产可行性集的所有性质,对于投入产出组合  $(x, y, b)$ 、方向向量  $g=(g_y, -g_b)$ , 方向性产出距离函数可以表述为:

$$\overline{D}_o(x, y, b; g_y, -g_b) = \sup \{ \beta : (y + \beta g_y, b - \beta g_b) \in P(x) \} \quad (2)$$

该方向性距离函数描述了在给定的生产可行性集  $P(x)$  下,沿着方向向量  $g=(g_y, -g_b)$  最大限度地扩张“好”产出,同时削减“坏”产出是可行的。

图1为方向性产出距离函数,假设 $F$ 点处在 $P(x)$ 集的边界上,那么 $\bar{D}_o(x_F, y_F, b_F; g_y, -g_b) = 0$ ; 如果点 $E$ 在 $P(x)$ 集内,那么 $\bar{D}_o(x_E, y_E, b_E; g_y, -g_b) = \frac{EF}{OG} > 0$ 。因此有,  $\bar{D}_o(x, y, b; g_y, -g_b) \geq 0$ 。

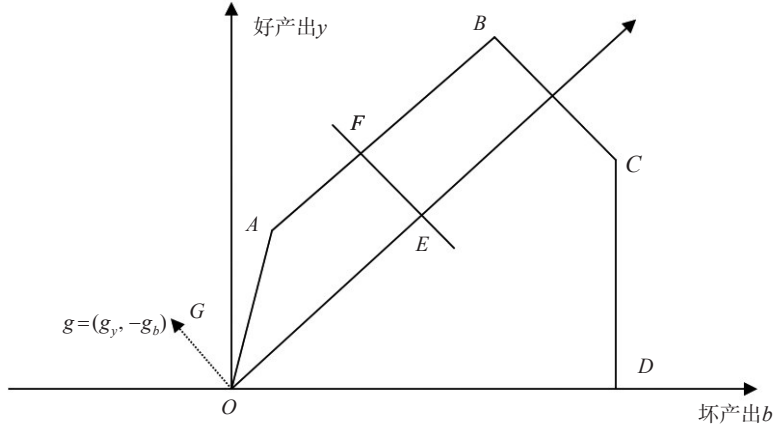


图1 方向性产出距离函数

除了从生产可行性集 $P(x)$ 继承来的性质外,方向性距离函数还满足转移性,定义如下:

$$\bar{D}_o(x, y + \alpha g_y, b - \alpha g_b; g) = \bar{D}_o(x, y, b; g) - \alpha \quad (3)$$

这个性质表明,如果一个企业“好”产出增加 $\alpha g_y$ ,同时“坏”产出削减 $\alpha g_b$ ,那么这个企业就会变得更有效率,也就是方向性距离函数减少了 $\alpha$ ,该性质对应谢泼德产出距离函数的齐次性。

## (二) 污染物的影子价格

方向性产出距离函数具有与收益函数互为对偶性的良好性质,可以从其对偶关系中求出“坏”产出的影子价格(Färe et al., 2006)。假定 $p = (p_1, \dots, p_M)$ 为“好”产出的价格向量, $q = (q_1, \dots, q_I)$ 为“坏”产出的价格向量,收益函数可以由以下方向性产出距离函数定义:

$$R(w, p, q) = \max_{y, b} \{py - qb: \bar{D}_o(x, y, b; g) \geq 0\} \quad (4)$$

其中, $w$ 表示投入要素的价格,该收益函数定义了在生产可能性集内,给定投入 $x$ 下的最大可能的收益。

根据方向性距离函数的定义,沿着方向向量 $g = (g_y, -g_b)$ 最大限度地扩张“好”产出,削减“坏”产出是可行的,因此有:

$$(y + \beta g_y, b - \beta g_b) = (y + \bar{D}_o(x, y, b; g) \cdot g_y, b - \bar{D}_o(x, y, b; g) \cdot g_b) \in P(x) \quad (5)$$

沿着方向向量消除无效率后的产出投入组合 $(x, y + \beta g_y, b - \beta g_b)$ 依然还在生产可能性集 $P(x)$ 内,那么有:

$$R(w, p, q) \geq p(y + \bar{D}_o(x, y, b; g) \cdot g_y) - q(b - \bar{D}_o(x, y, b; g) \cdot g_b) \quad (6)$$

(6)式还可写成以下形式:

$$R(w, p, q) \geq (py - qb) + p\bar{D}_o(x, y, b; g) \cdot g_y + q\bar{D}_o(x, y, b; g) \cdot g_b \quad (7)$$

(7)式的左边是在生产可行性集内允许的最大可能收益,右边是企业的实际收益加上通过增加“好”产出同时减少“坏”产出来消除无效率所带来的收益。当企业沿方向向量消除了技术无效率达到了产出边界,此时以上不等式将变为等式。

将(7)式表示为:

$$\bar{D}_o(x, y, b; g) = \min_{p, q} \left\{ \frac{R(w, p, q) - (py - qb)}{pg_y + qg_b} \right\} \quad (8)$$

分别对“好”产出、“坏”产出求导得:

$$\frac{\partial \bar{D}_o(x, y, b; g)}{\partial y} = \frac{-p}{pg_y + qg_b} \leq 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \bar{D}_o(x, y, b; g)}{\partial b} = \frac{q}{pg_y + qg_b} \geq 0 \quad (10)$$

因此,“坏”产出影子价格的表达式可写为:

$$q_i = -p_m \left( \frac{\partial \bar{D}_o(x, y, b; g) / \partial b_i}{\partial \bar{D}_o(x, y, b; g) / \partial y_m} \right), i = 1, \dots, I; m = 1, \dots, M \quad (11)$$

在这里,假设“好”产出的影子价格等于其观察到的真实价格,即  $p_m = p_m^o$ ,因此可以根据观察到的“好”产出的价格和求得的方向性距离函数来求解“坏”产出的影子价格<sup>①</sup>。

### (三)参数化的二次型方向性产出距离函数

求解方向性产出距离函数有参数法与非参数法两种形式,非参数法的优点就是不用定义函数形式就能求得距离函数值,但是,用此方法构造的线性近似产出集边界可能出现折点,在这些点上的斜率值不唯一,由此求得的距离函数也是不可微的,无法求得边际减排成本。而参数形式的方向性距离函数具有良好的微分性质,方便求解影子价格。综上所述,本文使用参数法来求解方向性距离函数。

目前较常见的是使用超越对数函数和二次型来参数化距离函数<sup>②</sup>。但是由于超越对数函数无法满足方向性距离函数的转移性质,一般被用于谢泼德产出距离函数的参数化,而二次型函数是对未知的距离函数的二阶近似,能很好地满足方向性产出距离函数的性质。

①影子价格的求解假设所有企业都位于生产边界上,这就引发了那些不处于生产边界上企业污染物影子价格的求解问题。要解决这类非技术效率有效企业的污染物影子价格求解问题,可以通过扩张或缩减其产出,使其达到边界来求其影子价格。然而,这种做法并不影响影子价格估计的准确性。因为距离函数具有产出一次齐次性,它的导数则具有产出的零次齐次性。因此,任何企业消除无效率的产出变化都不会影响到影子价格的计算。换句话说,不管投入产出组合位于生产集合的哪个位置,影子价格都可以通过用实际投入产出数据估算出的距离函数来求得。

②陈诗一(2010)使用了超越对数函数参数化的方向性产出距离函数来估算CO<sub>2</sub>的影子价格。

本文选择  $g=(1, -1)$  作为方向性产出距离函数的方向向量<sup>①</sup>, 意味着在给定投入的条件下, “好”产出进行单位扩张的同时, “坏”产出进行单位的削减。假定有  $K$  个企业, 那么第  $k$  个企业在第  $t$  期的二次型方向性产出距离函数的表达式为:

$$\begin{aligned} \overline{D}_o^t(x_k^t, y_k^t, b_k^t; 1, -1) = & \alpha_0 + \sum_{n=1}^N \alpha_n x_{nk}^t + \sum_{m=1}^M \beta_m y_{mk}^t + \sum_{i=1}^I \gamma_i b_{ik}^t + \\ & \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \alpha_{nn'} x_{nk}^t x_{n'k}^t + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \beta_{mm'} y_{mk}^t y_{m'k}^t + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I \sum_{i'=1}^I \gamma_{ii'} b_{ik}^t b_{i'k}^t + \\ & \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta_{nm} x_{nk}^t y_{mk}^t + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \eta_{ni} x_{nk}^t b_{ik}^t + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \mu_{mi} y_{mk}^t b_{ik}^t + v_t t + \frac{1}{2} v_{tt} t^2 + \\ & \sum_{n=1}^N \alpha_{nt} t x_{nk}^t + \sum_{m=1}^M \beta_{mt} t y_{mk}^t + \sum_{i=1}^I \gamma_{it} t b_{ik}^t + \sum_{k=1}^K \tau_k DI_k \end{aligned} \quad (12)$$

上式中,  $x$ 、 $y$ 、 $b$  分别是投入、“好”产出、“坏”产出变量。 $t$  是时间变量, 突出共同前沿下各年的时间效应。 $DI$  是根据企业个数设定的 34 个虚拟变量, 突出企业之间的个体差异。

本文通过使用线性规划方法, 求解出二次型方向性距离函数的各参数来估计方向性距离函数:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K [\overline{D}_o^t(x_k^t, y_k^t, b_k^t; 1, -1) - 0] \\ \text{s.t. } & \textcircled{1} \overline{D}_o^t(x_k^t, y_k^t, b_k^t; 1, -1) \geq 0, k=1, \dots, K; t=1, \dots, T \\ & \textcircled{2} \frac{\partial \overline{D}_o^t(x_k^t, y_k^t, b_k^t; 1, -1)}{\partial y_m} \leq 0, m=1, \dots, M; k=1, \dots, K; t=1, \dots, T \\ & \textcircled{3} \frac{\partial \overline{D}_o^t(x_k^t, y_k^t, b_k^t; 1, -1)}{\partial b_i} \geq 0, i=1, \dots, I; k=1, \dots, K; t=1, \dots, T \\ & \textcircled{4} \frac{\partial \overline{D}_o^t(x_k^t, y_k^t, b_k^t; 1, -1)}{\partial x_n} \geq 0, n=1, \dots, N \\ & \textcircled{5} \sum_{m=1}^M \beta_m - \sum_{i=1}^I \gamma_i = -1, \sum_{m=1}^M \beta_{mm'} - \sum_{i=1}^I \mu_{mi} = 0, m=1, \dots, M \\ & \quad \sum_{i=1}^I \gamma_{ii'} - \sum_{m=1}^M \mu_{mi} = 0, i=1, \dots, I; \sum_{m=1}^M \delta_{nm} - \sum_{i=1}^I \eta_{ni} = 0, n=1, \dots, N \\ & \textcircled{6} \alpha_{nn'} = \alpha_{n'n}, n \neq n', \beta_{mm'} = \beta_{m'm}, m \neq m', \gamma_{ii'} = \gamma_{i'i}, i \neq i' \end{aligned} \quad (13)$$

该线性规划的含义就是在约束条件下选择最合适的参数, 使得各时期各个企业对生产前沿的偏差和最小, 生产单元能最大程度地表现出其可能的效率。各约束条件的含义如下: ① 要求每个生产企业各时期的投入产出向量都是可行的; ② 表示“好”产出的单调性约束, “好”产出越多方向性距离函数值越小, 生产企业越有效率; ③ 表示“坏”产出的单调性约束, “坏”产出越多方向性距离函数值越大, 生产企业越没效率, “坏”产出被施加了影子价格的负约

① 选择  $g=(1, 1)$  为方向向量有利于节约参数, 并且满足转移性质。



束;④表示投入的单调性约束,投入越多方向性距离函数值越大,生产企业越没效率;⑤反映了方向性距离函数的转移特性;⑥反映了投入变量之间,“好”产出变量之间以及“坏”产出变量之间的对称性要求。

#### (四)产出替代弹性

在面对污染物管制,企业可以选择增大污染防治投入(潜在产出减少)、排放更多的其他弱管制污染物或者两者相结合来达到减排的目的。而污染物边际减排成本核算的是一单位污染物的减少使得潜在产出的减少,并没有将企业的另一种策略,即通过增加其他污染物的排放来达到目标管制污染物排放量减少所带来的“成本”增加包括进来,使得估算出的污染物边际减排成本可能因为企业的减排策略选择不同而出现较大差异,不能反映企业减排的真实状况<sup>①</sup>。

对于政策制定者来说,了解各个企业在面对污染物管制时的不同应对策略以及这些策略对企业边际减排成本的影响,更合理地看待企业面临的真实减排成本,并全面有效地评价环境政策的效果及企业的行为,显得尤为重要。为了解决以上问题,本文通过使用森岛通夫产出替代弹性来估算“好”“坏”产出之间的替代弹性以及粉尘对化学需氧量(COD)的替代弹性,分析各个企业在污染管制时的具体减排策略,为政策的制定与评价提供指导。

森岛通夫产出替代弹性的一般形式为:

$$M_{im} = \frac{d \ln(q_i/p_m)}{d \ln(y_m/b_i)} \text{ 和 } M_{ir} = \frac{d \ln(q_i/q_r)}{d \ln(b_i/b_r)} \quad (14)$$

其中,  $M_{im}$  为“好”产出对“坏”产出的替代弹性,  $M_{ir}$  为“坏”产出之间的替代弹性,  $p_m$ 、 $q_i$  和  $q_r$  分别为需要比较的“好”产出和两种污染物的价格,  $y_m$ 、 $b_i$  和  $b_r$  分别为它们的数量。式(14)描述了由两种产出比的百分变动带来其影子价格比的百分比变动。

使用方向性产出距离函数,式(14)也可写成:

$$M_{im} = y_m^* \left\{ \frac{\bar{D}_{im}}{\bar{D}_i} - \frac{\bar{D}_{mm}}{\bar{D}_m} \right\} \text{ 和 } M_{ir} = b_i^* \left\{ \frac{\bar{D}_{ir}}{\bar{D}_i} - \frac{\bar{D}_{rr}}{\bar{D}_r} \right\} \quad (15)$$

其中  $y_m^* = y_m + \beta(g_y)$ 、 $b_i^* = b_i - \beta(g_b)$ , 表示最优的产出边界,  $\bar{D}_m$ 、 $\bar{D}_i$  和  $\bar{D}_r$  是方向性距离函数的一阶导数,  $\bar{D}_{im}$ 、 $\bar{D}_{mm}$ 、 $\bar{D}_{ir}$  和  $\bar{D}_{rr}$  是方向性距离函数的二阶导数。本文对单调性的设定使得  $\bar{D}_m$  的符号为负,  $\bar{D}_i$  和  $\bar{D}_r$  符号为正,而凹性性质使得  $\bar{D}_{mm}$  和  $\bar{D}_{rr}$  都为负。因此,  $M_{im}$  的符号取决于  $\bar{D}_{im}$  的符号和大小,如果  $\bar{D}_{im} < 0$ , 那么  $M_{im}$  为负,如果  $\bar{D}_{im} > 0$  并且足够的大,那么  $M_{im}$  就可能为正。而  $M_{ir}$  的符号则取决于  $\bar{D}_{ir}$  的符号和大小,如果  $\bar{D}_{ir} > 0$ , 那么  $M_{ir}$  为正,如果  $\bar{D}_{ir} < 0$  并且绝对值足够的大,那么  $M_{ir}$  就可能为负。  $M_{im}$  值为负意味着这两种产出为互补关

①同一个企业在减少一单位污染物时,选择加大污染治理投入所测得的减排成本要大于选择增加排放其他污染物测得的减排成本,而实际上,不管选择何种策略,其真实的减排成本应该是一样的。

系,即随着一种污染物的减少,产出也会随之减少,污染物的减排以牺牲潜在产出的增长为代价, $M_{im}$ 的绝对值越大,表示互补程度越强。 $M_{ii}$ 为正意味着两种污染物产出为替代关系,即随着污染物管制严厉程度的增加(目标污染物的减少),企业可能会转向排放更多的另一种污染物来应对该管制,该值越大表示两种污染物的替代难度越大,需要排放更多另一种污染物来换取被管制污染物的减少。通过对 $M_{im}$ 和 $M_{ii}$ 的符号及大小的判断,可以分辨出不同的企业在面对污染物管制时可能选择的不同应对策略,以帮助政策制定者更好地制定和评价环境政策。

## 四、数据处理及实证分析

### (一)数据来源与处理

本文所用到的数据是东莞市35家造纸企业2004–2008年包括污染排放在内的投入产出数据,基础数据来源于东莞市环境保护局及国家统计局<sup>①</sup>。以造纸工业作为研究对象很大程度上是因为工业部门产生的污染排放占比最大,而造纸工业又是整个工业的重要污染排放源。据中国造纸工业2013年度报告显示,造纸工业的废水排放量为34.27亿吨,占全国工业总废水排放量的16.9%,其中排放废水中的化学需氧量为62.3万吨,占全国工业COD总排放的20.5%。在造纸工业中选择东莞市造纸企业作为数据样本,主要是因为数据的可得性且广东省是我国造纸工业的第二大生产省份,而东莞市的纸制品产量又占全省总产量的61.94%,使得东莞市的造纸行业在全国造纸行业中占有重要地位并有一定的代表性。

#### 1. “好”产出指标

由于缺少造纸企业2004年的总产值数据,而销售产值与总产值呈较一致的变动趋势,因此本文选择销售产值作为“好”产出指标(Murty & Kumar, 2002)。为了剔除价格因素的影响,本文选择东莞市造纸及纸制品业2004–2008年的工业品出厂价格指数,并将其转化为以2004年为基期,然后用该指数对销售产值进行平减。

#### 2. “坏”产出指标

造纸企业排放的污染物主要包括废水中的化学需氧量(COD)、生物需氧量(BOD)、氨氮、悬浮物(SS),废气中的SO<sub>2</sub>、氮氧化物、烟尘,固体废物中的危险废物、冶炼炉渣、粉煤灰、煤矸石、尾矿、脱硫石膏等。国外文献中对于造纸企业“坏”产出的选择主要集中在COD、BOD、SS这三种污染物(Färe et al., 1993; Chung et al., 1997),主要是因为这三种污染物排放量很大,对水质及水生物的生存也有很大的影响。本文参考同类文献对“坏”指标的选择,结合本文的研究内容,选择了化学需氧量及粉尘作为两个“坏”产出指标。选择COD主要是因为造纸工业

<sup>①</sup>作者基于微观数据的可获得性,尤其是微观企业污染排放数据的限制,选取了2004–2008年的数据进行分析。

排放的化学需氧量在整个工业行业所占的比重较大,对环境的影响明显,又是环境管理的重点目标。选择同类文献较少选择的粉尘,是考虑到本文研究的内容需要选择一个受环境管制较少的污染物来研究其与关键污染物之间的产出替代关系,而本文中粉尘的数据又较为齐全,正好符合要求。

3. 投入指标

(1)资本投入。关于资本指标,本文选择的是固定资产净值年平均余额,部分年度没有固定资产净值年平均余额数,采用前一年和本年的固定资产净值年末余额数的平均值。由于没有东莞市的固定资产投资价格指数,本文采用广东省的固定资产投资价格指数转化为以2004年为基期对固定资产净值年平均余额的增量进行平减(朱钟棣、李小平,2005)。具体折算方法如下:

$$K_i(t)=K_i(t_0)+\sum_{t_0+1}^t \Delta K_i(t)/P_i(t) \tag{16}$$

(16)式中,  $K_i(t)$ 、 $P_i(t)$  分别表示第  $i$  个企业在第  $t$  年的固定资产净值年平均余额和广东省以2004年为基期的固定资产投资价格指数。  $K_i(t_0)$  表示第  $i$  个企业的基期固定资产净值年平均余额。

(2)劳动投入。关于劳动指标,本文选择各个企业的年末从业人员合计数。

(3)资源投入。东莞市企业众多、人口密集,用水需求量极大,再加上境内水资源时空分布不均等原因,造成东莞市水资源供需形势日益严峻。多年来东莞市人均占有本地水资源量仅为253立方米,不仅远低于国际公认的每人1750立方米的国际用水紧张线,而且低于500立方米的严重缺水线。基于数据的可获得性以及造纸企业的生产过程中需要以巨量的水作为资源投入的事实,本文还选择了用水量作为一种资源投入纳入到污染物影子价格的估算中。

取2004-2008年各变量的平均值及其增长率进行统计描述。相关投入产出指标统计描述如表1所示:

表 1 2004-2008 年投入产出指标的统计描述						
投入产出指标	大规模( $K \geq 30000$ )		中等规模( $10000 \leq K < 30000$ )		小规模( $K < 10000$ )	
	平均值	增长率	平均值	增长率	平均值	增长率
销售产值	850382.99	2.97%	67458.59	2.68%	39072.68	4.27%
COD	492112.56	70.71%	140396.45	54.50%	82690.10	38.27%
粉尘	418459.34	23.94%	79849.20	89.77%	73261.40	199.9%
资本投入	583569.37	-4.33%	19994.78	-1.99%	4740.59	-1.69%
劳动人数	801.71	3.02%	186.61	-1.29%	124.82	1.55%
用水量	16457179.21	57.26%	5922033.11	-4.82%	1810545.70	19.85%

注:销售产值(千元)、COD和粉尘(Kg)、资本投入(千元)、从业人数(人)、用水量(吨)。

从表1中可以看出,2004-2008年大规模企业在享受最高的销售产值的同时,其排放的污染物,以及所使用的资本投入、劳动力投入、水资源投入也是所有企业中最高的。小规模企业

虽然销售产值最低,但是其消耗的各项投入以及排放的污染物也是所有企业中最底的。从各指标增长速率的角度看,小规模企业销售产值的平均增长率最高,COD排放量增长的速率最低,但是其排放的粉尘的增长率却是最高的。这说明,虽然小规模企业COD排放量控制的很好,但是其有可能不是依靠技术改进或者采用洁净生产过程来控制的(销售产值增长率最高,没有损失生产力),而是依靠排放更多的另一种弱管制污染物来实现的,中规模企业亦是如此。相比而言,大规模企业虽然COD排放控制的不是很理想,但是其排放的粉尘增长率却是所有企业中最底的。

(二)实证结果分析

运用上述的研究方法和数据,可以对方向性距离函数的参数值进行估计,结果如附表1。根据参数估计值,可以对方向性距离函数进行相关检验以显示估计值的适用性。首先检验样本“好”产出与“坏”产出的零结合公理是否得到满足。零结合公理要求“好”产出和“坏”产出是联合生产的,即产出向量  $(y>0, b=0)$  是不可行的,不在生产集内。该检验可以由  $y>0$  情况下,  $\bar{D}_o(x,y,0;1,-1)$  的取值小于0表述。经检验,175个样本中有143个样本满足零结合公理。其次,不满足“坏”产出的单调性约束的样本个数分别为1个(COD)、2个(粉尘),即方向性距离函数对“坏”产出求一阶导为负的样本。最后,所有样本都满足  $\bar{D}'_o(x'_k,y'_k,b'_k;1,-1)\geq 0$  及“好”产出的单调性约束,表明参数估计结果具有较好的适用性。

1. 污染物的影子价格

在估算出的参数值基础上,可以求出这175个造纸企业样本的两种污染物影子价格。由于选择的期望产出是价值型的销售产值,因此期望产出的价格为1,由此得到污染物的绝对影子价格。表2给出了这两种污染物影子价格的部分统计信息以及方向性距离函数值。

表2 东莞市造纸企业污染物的平均影子价格

年份	影子价格(万元/吨)		方向性产出距离函数值
	COD	粉尘	
2004	13.87	2.83	0.26
2005	10.58	3.76	0.18
2006	7.29	3.06	0.07
2007	3.00	2.23	0.10
2008	1.87	2.72	0.06
2004-2008	5.70	2.88	0.12

在2004-2008年期间,东莞市造纸企业排放的COD、粉尘的平均边际减排成本分别为5.70万元/吨、2.88万元/吨,两种污染物的边际减排成本相差较大,反映了二者的处理成本不同,平均而言,处理一吨COD带来的损失为5.7万元,而处理一吨粉尘带来的损失约为2.88万

元。该结果与同类研究所得出的结论有所差异, Murty 和 Kumar(2002)估计的印度水污染企业 COD 的影子价格为 7.7 万卢比/吨(约合人民币 1.08 万元/吨),胡庆年等(2011)估算的台州市 COD 影子价格为 4.479 万元/吨, Färe 等(1993)估算的粉尘影子价格为 25270 美元/吨(约合人民币 16 万元/吨), Murty 等(2007)估算的部分印度燃煤发电厂排放的粉尘影子价格为 4777 卢比/吨(约合人民币 0.07 万元/吨),袁鹏和程施(2011)基于市域数据估计出的工业烟尘平均影子价格为 4.597 万元/吨。这些差异可能由研究的对象不同、所用的方法不同及数据层面的不同造成。一般而言,越是发达的国家影子价格相对来说会更高些。本文采用的是企业层面的数据,相比国内目前研究所采用的省域及市域数据更微观,得出的影子价格估计值也更能反映企业的真实边际减排成本<sup>①</sup>。国内部分城市目前已经开通 COD 和 SO<sub>2</sub> 的排污权交易市场,因此可以将本文估算出的 COD 影子价格与其排污权交易价格作比较。见于公开报道的 COD 交易价格集中在 5000~20000 元/吨,而本文估算得到的 COD 影子价格为 5.7 万元/吨,明显高于观察到的污染物排放交易价格。因此,造纸企业应该会积极地参与到排污权交易中,以此来降低自身的排污成本<sup>②</sup>。

从时间演进上来看,COD 的影子价格从 2004 年至 2008 年呈现逐年递减的趋势,粉尘的影子价格则表现得较为平稳。一般来说,污染物的边际减排成本倾向于随着环境管制的严厉程度的增加而增大。不过 Kwon 和 Yun(1999)研究发现,在 1990-1995 期间,韩国发电厂排放的 SO<sub>x</sub>、TSP 也呈现出影子价格逐年递减的趋势,并认为该国的环境管制弱于诸如美国等发达国家。本文得出的影子价格随时间递减的结论,也说明了我国对于造纸企业的污染管制程度弱于一些发达国家。

企业排放的污染物影子价格与其排放强度或者排放水平之间有着重要的关系,本文按照污染物的排放强度将这 35 个企业分成三类,结果如表 3:

表 3 COD 和粉尘排放强度与其污染物影子价格的关系

排放强度 $x$ (kg/千元)	COD		粉尘	
	企业个数	影子价格	企业个数	影子价格
$0 < x \leq 1$	9	9.3803	22	3.353
$1 < x \leq 2$	13	6.6104	7	3.588
$x > 2$	13	6.6076	6	0.558

①由于工业总量数据往往包含那些污染物排放少或者几乎不排放污染物的企业数据,而目前研究较一致的指出,污染物排放越少的企业污染物的影子价格越高,因此,把那些企业数据包括在总量数据中难免会带高整体影子价格,造成影子价格的高估。

②在现实中,当前国内企业参与排污权交易市场的热情并不高。其可能原因是:现有的环境保护法规执行不足和排污总量控制不到位,这些都会导致企业违法排污成本低,从而使得企业参与排污权交易市场的积极性不高。当然,交易价格机制的不完善也可能使企业在购买排污权和减少排放之间作出非理性选择。



从表3可知,随着COD排放强度的增加,COD的平均影子价格呈现下降的趋势,COD的影子价格与其排放强度逆相关。也就是说,越“脏”的企业拥有越低的污染物边际减排成本,粉尘的影子价格也表现出类似的趋势,这与Coggins和Swinton(1996)、Martínez等(2001)、Murty和Kumar(2002)得出的结论相一致。

为了了解造纸企业的规模与其污染物的边际减排成本之间的关系及其可能的原因,为政府部门政策的制定提供指导意见,本文按照固定资产净值年平均余额(千元)小于10000、大于等于10000小于30000、大于等于30000为规模的划分标准,将35个企业分成三组,结果如表4:

表4 企业规模与其污染物影子价格的关系			
企业规模	企业个数	平均影子价格(万元/吨)	
		COD	粉尘
小	8	6.385	0.529
中	16	6.601	0.663
大	11	9.051	7.944

从表4可以看出,规模越大的企业其污染物的影子价格越高。这可能是因为政府为了鼓励中小企业的发展,往往把大企业的污染排放作为重点监管对象,使得大企业对污染治理的投入较高,从而大企业的污染物排放的边际减排成本也较高。因此,政府部门应鼓励不同规模的企业之间进行排污权交易,大规模企业向中小规模企业购买排污权指标,或者是通过政府直接分配污染物排放份额给各个企业(卞亦文,2010),以最低的社会总成本来完成减排目标。

## 2. 影子价格的影响因素分析

从上述结果可发现,同一污染物在不同企业之间以及相同企业的不同年份之间存在很大的差异,究竟是哪些因素导致了这些差异的存在,这将是本部分研究的主要内容。本文对于影响因素的选择主要是根据所研究行业的特殊性、已有的相关研究成果以及数据的可得性来确定,所选指标包括污染物排放强度( *Intensity* ,以污染物的排放量与销售产值的比值表示),企业规模( *Size* ,用企业经固定资产投资价格指数平减后的固定资产净值年平均余额来表示),禀赋结构( *KL* ,由资本-劳动比来表示),企业类型( *Type* ,分为港澳台三资企业和内资企业两种类型,用虚拟变量来表示,其中三资企业用0表示,内资企业用1表示),产品品种( *Product* ,分为工业商业用纸和生活用纸,用虚拟变量表示,其中工业商业用纸用0表示,生活用纸用1表示),企业成立时间( *Establish* ,用企业注册成立的年份表示,分布在1987-2004年之间)。我们把污染物影子价格( *Sp* )作为因变量,上述六个影响因素作为自变量( *X* ),构建回归模型如下:

$$Sp_{kt} = \beta_0 + X_{kt}'\gamma + \eta_t + \mu_{kt} \quad (17)$$

其中,  $k$  和  $t$  表示第  $k$  个企业第  $t$  年的对应值,  $\mu_{kt}$  为随机误差项。回归结果如表 5 所示:

表 5 污染物影子价格的影响因素分析

变量	粉尘		COD	
	系数	t-统计值	系数	t-统计值
<i>Intensity</i>	-0.2141*	-1.934	-0.1674	-0.322
<i>Size</i>	0.0002***	83.794	0.0001***	6.455
<i>KL</i>	-0.0150	-1.359	-0.0021	-0.091
<i>Type</i>	4.5613	0.935	-0.5264	-0.122
<i>Product</i>	0.0961	0.078	-0.4213	-0.245
<i>Establish</i>	0.0531	0.284	0.0152	0.058
常数项	-102.0350	-0.275	103.2361	0.199
年份固定效应	Yes		Yes	
Obs.	175		175	
Adj.R <sup>2</sup>	0.975		0.868	

注:\*\*\*、\*\*、\*分别表示在 1%、5%、10%水平下显著。

根据表 5 的回归结果可以看出,企业规模对粉尘的影子价格影响显著正相关,说明规模越大的企业拥有越高的影子价格,这与本文前面部分对三类规模企业的分组显示出的趋势相一致,验证了前面部分通过企业规模分组推测出的二者关系;企业规模对 COD 影子价格的影响也是显著的,二者正相关,说明企业规模的不同对污染物影子价格的影响确实存在。资本-劳动比与影子价格负相关,这与涂正革(2008)的研究结论相似。若地区资本-劳动比上升,说明该企业的经济结构正从劳动密集型向资本密集型转化,而资本密集型企业 and 劳动密集型企业分别倾向于重污染企业和轻污染企业,重污染企业往往拥有较低的边际减排成本。Färe 等(1993)的研究中也指出,企业的生产技术上的差别可能会影响到其污染物边际减排成本的大小。

污染物排放强度与 COD 影子价格负相关,这与 Murty 等(2007)、Martínez 等(2001)的研究结论相一致。污染物的排放强度反映了企业为生产每一单位“好”产出排放的污染物数量。Murty 和 Kumar(2002)、Martínez 等(2001)的研究都指出污染物的排放强度与其影子价格成反比,越“脏”的企业拥有越低成本的污染物边际减排成本,说明存在排放的规模经济。

3. 产出替代弹性

(1)“好”产出对“坏”产出的替代弹性。本文根据森岛通夫产出替代弹性方程和估算出来的方向性产出距离函数,分别求得了“好”产出对 COD 以及“好”产出对粉尘的替代弹性,并根据企业规模进行比较分析。观察表 6 可发现,不同规模的企业在对污染物处理上所增加的投入是不同的。大规模企业为减少排放一单位 COD 投入的资金最多,中等规模企业次之,小规模企业投入的最少。而在减少排放一单位粉尘时,也是大规模企业所作出的努力最大,小企业次之,中规模企业最后。同时也说明了所有企业在面对污染物管制时,都在污染治理或者污染防治上做了适量的投入,并且为了控制 COD 排放所增加的投入大于为控制粉尘增加的投入。

表 6 企业规模与好“坏”产出之间的替代弹性关系

企业规模	企业个数	好产出对坏产出的替代弹性	
		COD	粉尘
小	8	-0.0569	-0.1460
中	16	-0.0808	-0.1387
大	11	-1.4653	-0.2884

(2)粉尘对COD的替代弹性。本文使用  $M_{it}$  来衡量粉尘对COD的替代弹性<sup>①</sup>。 $M_{it}$  的符号和大小可以反映企业在面对COD管制时,是否通过增加粉尘的排放来替代目标污染管制物的减少,以及粉尘对COD的替代互补的难易程度。在剔除了四个不符合条件的样本后,剩下的171个样本中,有23个样本的产出替代弹性值为负,其余的都为正,说明大部分企业面对COD污染管制时,都会选择依靠增加另一种弱管制或者无管制污染物粉尘的排放来应对。当然,粉尘和COD两类污染物在生产过程中可能是相伴的,但由于替代关系的存在,COD会比原来相应地减少而粉尘相应地增加。在2004-2008年间,粉尘对COD的替代弹性值如下图2所示:

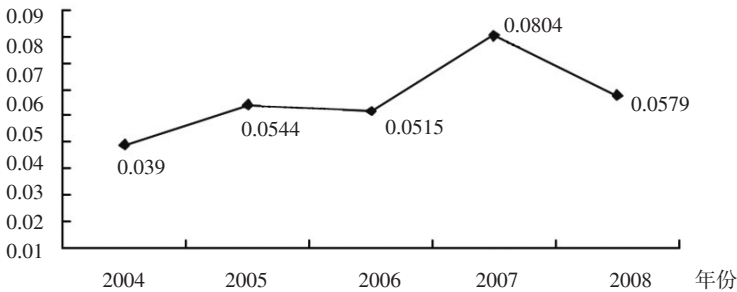


图2 粉尘对COD的替代弹性

从图2可以发现这两种污染物之间是有替代关系的,并且其替代的程度越来越大,即企业为了减少一单位COD的排放所增加的粉尘排放量是呈上升趋势的。也就是意味着,环境管制是否真正地提高了社会福利,取决于目标管制污染物排放值下降所带来的福利上升是否大于所牺牲的潜在产出的增长以及另一污染物排放增加导致的福利损失之和。因此,政策制定者不应只以目标管制污染物的排放值作为衡量政策效果的唯一标准,还应关注企业因此损失的潜在产出增长及排放的其他污染物变动水平。

<sup>①</sup>目前国内外的文献中对于产出替代弹性的计算主要集中在“好”产出对“坏”产出上,很少有文献对“坏”产出之间的替代弹性进行研究。

表 7 175 个样本企业粉尘对 COD 的替代弹性值

企业编号	替代弹性值						固定资产
	2004	2005	2006	2007	2008	平均	
1	0.0275	0.0439	0.0625	0.3135	0.1560	0.1207	750.5
2	0.0041	0.0121	0.0108	1.2353	0.0950	0.2715	2199.7
3	0.0304	0.0559	0.0419	0.0437	0.0431	0.0430	2729.4
4	0.0277	0.0421	0.0569	0.1730	0.0124	0.0624	2867.7
5	0.0701	0.0819	0.1262	0.4452	0.1958	0.1838	6065.1
6	0.0789	0.1144	0.0791	0.3148	0.0368	0.1248	7134.1
7	-0.0050	0.1137	0.2341	0.1336	0.0931	0.1139	7395.6
8	0.0104	0.0219	0.0426	0.0537	0.0400	0.0337	8551.7
9	0.0223	0.0456	0.0019	0.1995	0.0484	0.0635	13573.5
10	0.1030	0.0586	0.0725	0.2723	-	0.1266	14387.5
11	0.0555	0.1214	0.0498	0.5542	0.0130	0.1588	14881.5
12	0.1125	0.0050	0.0112	0.2721	0.0087	0.0819	16751.4
13	0.0165	0.0374	0.0065	0.0546	-0.0028	0.0224	17693.4
14	0.0351	0.0572	0.0898	0.8693	0.5258	0.3154	18018.4
15	0.0206	0.0351	-0.0068	0.6219	-0.0021	0.1337	19961.5
16	0.0185	0.0092	0.0205	0.1559	0.0031	0.0414	19975.5
17	0.0015	0.0517	0.0931	0.2037	0.0259	0.0752	20993.9
18	0.0093	0.0293	0.0523	0.1666	0.0121	0.0539	21669.5
19	0.1150	0.1123	0.0859	0.4838	-0.0262	0.1541	23022.1
20	0.0216	0.0202	-0.0034	0.0597	0.0413	0.0279	24049.9
21	0.1554	0.2140	0.1830	2.1414	-	0.6734	25275.9
22	0.0204	0.0416	0.0592	0.7383	0.1760	0.2071	27950.7
23	0.0582	0.0771	0.1500	0.7342	0.0636	0.2166	29336.4
24	0.0156	0.0339	-0.0093	0.9564	-0.0292	0.1935	29483.9
25	0.1847	0.3175	0.0965	2.1728	0.0599	0.5663	35377.8
26	0.0249	0.0198	0.0519	0.2501	0.0461	0.0786	45074
27	0.0111	0.0105	0.0050	0.0952	0.0434	0.0330	50854.6
28	0.0453	0.0971	0.1035	0.2722	0.2908	0.1618	54748.2
29	-0.0380	-0.0683	-0.0546	0.0378	0.0055	-0.0235	59186.7
30	0.0717	0.0754	0.0610	0.5112	0.0234	0.1485	80498.4
31	-	0.0236	0.0599	0.3718	0.0346	0.1225	171921.4
32	0.0174	0.0190	-0.0030	0.0062	-0.0093	0.0061	390701.5
33	0.0053	0.0021	0.0007	-	-0.0531	-0.0113	1329571
34	-0.0231	-0.0016	-0.0001	-0.0321	-0.0529	-0.0220	1554468
35	0.0008	-0.0248	-0.0286	-12.1467	-0.0073	-2.4413	2911273

在前文的数据描述中可看出,不同规模的企业在应对 COD 管制所作出的反应似乎有所

不同,有的企业更多的是通过将原来用来生产“好”产出的投入转向污染治理,而有的企业则更多的通过排放更多弱管制或无管制污染物来应对。下面就企业规模与其“坏”产出替代弹性之间的关系作相应分析,以便了解不同规模企业的减排策略。从上表7中可以看到,规模最大的前三个企业平均“坏”产出替代弹性都为负,还有一个平均“坏”产出替代弹性为负的企业规模排第7。平均“坏”产出替代弹性为负的企业都归属于大规模企业。

根据前面部分对企业规模的分类,将企业规模与其污染物替代弹性值之间的关系用下表描述。从表8中可看出,中小型造纸企业的污染物替代弹性值为正,意味着这两类企业在面对COD管制时更多的是通过排放粉尘来应对,这样使得其粉尘排放的增长速度急剧上升,而其销售产值却没受多大影响。大规模企业的污染物替代弹性值为负,意味着其在面对COD管制时,更多的是通过将原来用来生产“好”产出的投入转向污染治理(前端或者末端治理),从而使得其销售产值的表现不是非常良好,但是其粉尘的排放量控制的很好。这与前文的统计数据描述所能得出的大致信息相一致。

表8 企业规模与其“坏”产出替代弹性的关系		
企业规模	企业个数	粉尘对COD的产出替代弹性值
小	8	0.1192
中	16	0.1591
大	11	-0.1256

因此,政府部门在评价一个企业的减排效果时,不应仅仅凭其是否完成了减排目标来衡量<sup>①</sup>,而要分析其选择的具体减排策略,对于那种不可持续发展的减排策略,应积极予以阻止。本部分得出的结论还能对前面部分得出的规模越大的企业边际减排成本越高做一个修正。中小企业的污染物边际减排成本虽然低于大规模企业,但如果把其因为减少排放目标管制污染物而增加排放的粉尘成本包括进来,结论可能完全不同。

五、结论与建议

本文基于东莞市2004-2008年35个造纸企业包括污染物排放在内的投入产出数据,运用参数化的二次型方向性产出距离函数估算了COD及粉尘的影子价格,并测算了“好”产出对“坏”产出以及这两种“坏”产出之间的产出替代弹性。研究结论及其对应政策建议主要有:

(1)在2004-2008年期间,东莞市造纸企业排放的COD及粉尘的平均影子价格分别为5.70万元/吨、2.88万元/吨,基于微观企业数据估算出的污染物影子价格往往更加贴近其真实

<sup>①</sup> 大规模企业虽然减排任务的完成量没中小企业好,但其实质上作出的贡献有可能大于中小企业。



值,可以为排污权交易价格的制定提供参考。COD的影子价格呈现逐年递减的趋势,粉尘的影子价格则表现的较为平稳。这些结果表明我国对于造纸企业的污染管制程度弱于部分发达国家。因此,我国应加大对造纸企业污染物排放的管制力度,不仅要建立市场预警机制,严格控制造纸工业的用水总量和主要污染物排放总量,还要落实造纸企业治污主体责任,按照相关标准规范开展动态监测和及时处罚。而造纸企业也应依法依规申请排污许可证,持证排污。

(2)随着COD排放强度的增加,COD的平均影子价格呈现下降的趋势,COD的影子价格与其排放强度逆相关,也就是说,越“脏”的企业拥有越低的污染物边际减排成本,粉尘的影子价格也表现出类似的趋势。在这种情况下,对于不同企业收取差别化的污染税或推动这些企业进行排污权交易,相比命令控制型措施,能更为有效地减少污染治理成本和控制污染。规模越大的企业污染物影子价格越高。因此,政府部门应鼓励不同规模的企业之间进行排污权交易,大规模企业向中小规模企业购买排污权指标,以最低的社会总成本来完成减排目标。政府应该采取有力措施加快推进造纸企业兼并重组,改变数量多、规模小的局面,以规模化先进产能替代落后产能,优化产业规模和提升产业质量。同时,政府也应该合理设置污染物排放权的定价机制,使得企业的减排成本和交易成本向均衡方向靠近,减少企业违规进行污染排放的行为,促进造纸企业的绿色发展。

(3)造纸企业在面对严厉的COD排放管制时,不仅仅会增加对该污染物排放的防治投入,同时还会选择增加排放管制较少的粉尘排放来应对,并且不同规模企业对该策略的组合不同。如果将因此增加的粉尘排放成本包括在边际减排成本内,中小规模企业的污染物影子价格很有可能会大于大规模企业。政策制定者在评价一个企业的减排效果时,要分析其选择的具体减排策略,关注企业排放的其他污染物变动水平,避免通过加大排放其他污染物来替代目标污染物减少的可持续发展的减排策略,切实提高全社会的福利水平。另外,造纸企业应该积极研发并应用秸秆制浆清洁生产技术,提升造纸装备自主化水平,特别是中小企业技术改造和装备的升级换代。只有通过清洁生产的技术改造和升级,才能促进造纸业在生产过程中各种污染物的协同减排。

本文是目前国内为数不多的基于微观企业数据估算污染物影子价格的文章,微观数据的使用使得理论结果进一步贴近现实问题,结论能更有效地运用到生产实践和政策制定中去,填补我国污染物影子价格研究在企业层面的空白。当然,为了得到足够大的样本数量,本文舍弃了2003年的样本数据以及造纸企业排放的其他污染物,如悬浮物(SS)、二氧化硫(SO<sub>2</sub>)、生物需氧量(BOD)、氨氮等,使得研究的时期相对较短,污染物的种类太少,再加上选取投入产出指标的主观性及数据局限在东莞市等,这些研究的不足都可能影响到估算结果的准确性,以及某些结论的说服力。在对污染物边际减排成本的修正中,也没找到具体的量化指标而只是提了一个大致的猜想,这些都将是未来研究的方向。

附表 1 二次型方向性距离函数参数估计值

序号	变量	系数	估计值	序号	变量	系数	估计值
1	截距	$\alpha_0$	-0.0117	36	$tb_2$	$\gamma_{2t}$	-0.0010
2	$y$	$\beta_1$	-0.8571	37	$DI_1$	$\tau_1$	-2.6323
3	$b_1$	$\gamma_1$	0.1341	38	$DI_2$	$\tau_2$	0.0140
4	$b_2$	$\gamma_2$	0.0089	39	$DI_3$	$\tau_3$	-0.1930
5	$0.5y^2$	$\beta_{11}$	-0.0095	40	$DI_4$	$\tau_4$	-0.2526
6	$y b_1$	$\mu_{11}$	-0.0070	41	$DI_5$	$\tau_5$	-0.0740
7	$y b_2$	$\mu_{12}$	-0.0025	42	$DI_6$	$\tau_6$	0.0854
8	$0.5b_1^2$	$\gamma_{11}$	-0.0060	43	$DI_7$	$\tau_7$	0.0314
9	$b_1 b_2$	$\gamma_{12}$	-0.0010	44	$DI_8$	$\tau_8$	-0.0817
10	$0.5b_2^2$	$\gamma_{22}$	-0.0014	45	$DI_9$	$\tau_9$	0.0012
11	$x_1$	$\alpha_1$	0.5707	46	$DI_{10}$	$\tau_{10}$	1.2418
12	$x_2$	$\alpha_2$	0.3984	47	$DI_{11}$	$\tau_{11}$	0.0729
13	$x_3$	$\alpha_3$	0.0090	48	$DI_{12}$	$\tau_{12}$	-0.0935
14	$0.5x_1^2$	$\alpha_{11}$	-0.0918	49	$DI_{13}$	$\tau_{13}$	0.0375
15	$x_1 x_2$	$\alpha_{12}$	0.0975	50	$DI_{14}$	$\tau_{14}$	-0.0247
16	$x_1 x_3$	$\alpha_{13}$	0.0011	51	$DI_{15}$	$\tau_{15}$	-0.0456
17	$0.5x_2^2$	$\alpha_{22}$	-0.2085	52	$DI_{16}$	$\tau_{16}$	-0.0631
18	$x_2 x_3$	$\alpha_{23}$	-0.0078	53	$DI_{17}$	$\tau_{17}$	-0.0171
19	$0.5x_3^2$	$\alpha_{33}$	-0.0003	54	$DI_{18}$	$\tau_{18}$	-0.0484
20	$x_1 y$	$\delta_{11}$	0.0261	55	$DI_{19}$	$\tau_{19}$	-0.0896
21	$x_1 b_1$	$\eta_{11}$	0.0045	56	$DI_{20}$	$\tau_{20}$	-0.0898
22	$x_1 b_2$	$\eta_{12}$	0.0215	57	$DI_{21}$	$\tau_{21}$	1.6773
23	$x_2 y$	$\delta_{21}$	0.0142	58	$DI_{22}$	$\tau_{22}$	-0.1142
24	$x_2 b_1$	$\eta_{21}$	0.0149	59	$DI_{23}$	$\tau_{23}$	-0.2374
25	$x_2 b_2$	$\eta_{22}$	-0.0007	60	$DI_{24}$	$\tau_{24}$	-0.3243
26	$x_3 y$	$\delta_{31}$	0.0028	61	$DI_{25}$	$\tau_{25}$	0.2216
27	$x_3 b_1$	$\eta_{31}$	0.0027	62	$DI_{26}$	$\tau_{26}$	0.0155
28	$x_3 b_2$	$\eta_{32}$	0.0001	63	$DI_{27}$	$\tau_{27}$	0.1141
29	$t$	$v_t$	0.0115	64	$DI_{28}$	$\tau_{28}$	-0.0907
30	$0.5t^2$	$v_{tt}$	-0.0027	65	$DI_{29}$	$\tau_{29}$	-0.0592
31	$tx_1$	$\alpha_{1t}$	-0.0465	66	$DI_{30}$	$\tau_{30}$	-0.0209
32	$tx_2$	$\alpha_{2t}$	0.0390	67	$DI_{31}$	$\tau_{31}$	0.1856
33	$tx_3$	$\alpha_{3t}$	0.0018	68	$DI_{32}$	$\tau_{32}$	-0.0685
34	$ty$	$\beta_{1t}$	-0.0272	69	$DI_{33}$	$\tau_{33}$	-0.0338
35	$tb_1$	$\gamma_{1t}$	-0.0262	70	$DI_{34}$	$\tau_{34}$	-0.0764

参考文献:

- [1] 卞亦文. 基于DEA的污染物排放配额分配方法研究[J]. 运筹学学报, 2010, (04): 75-82.
- [2] 陈诗一. 工业二氧化碳的影子价格: 参数化和非参数化方法[J]. 世界经济, 2010, (08): 93-111.
- [3] 陈诗一. 边际减排成本与中国环境税改革[J]. 中国社会科学, 2011, (03): 85-100.
- [4] 胡庆年, 陈海棠, 王浩. 化学需氧量、二氧化硫排污权价格测算[J]. 水资源保护, 2011, (04): 79-82.
- [5] 黄文若, 魏楚. 中国各省份二氧化碳影子价格研究[J]. 鄱阳湖学刊, 2012, (02): 70-78.
- [6] 刘明磊, 朱磊, 范英. 我国省级碳排放绩效评价及边际减排成本估计: 基于非参数距离函数方法[J]. 中国软科学, 2011, (03): 106-114.
- [7] 涂正革. 环境、资源与工业增长的协调性[J]. 经济研究, 2008, (02): 93-105.
- [8] 涂正革. 工业二氧化硫排放的影子价格: 一个新的分析框架[J]. 经济学(季刊), 2010, (01): 259-282.

- [9] 万伦来,陶建国. 煤炭资源开采环境污染物影子价格的估计——基于安徽煤炭企业的调查数据[J]. 中国人口·资源与环境,2012,(08):71-75.
- [10] 魏楚. 中国城市 CO<sub>2</sub> 边际减排成本及其影响因素[J]. 世界经济,2014,(07):115-141.
- [11] 袁鹏,程施. 我国工业污染物的影子价格估计[J]. 统计研究,2011,(09):66-73.
- [12] 朱钟棣,李小平. 中国工业行业资本形成、全要素生产率变动及其趋异化:基于分行业面板数据的研究[J]. 世界经济,2005,(09):51-62.
- [13] Blackorby, C. and R. R. Russel. Will the Real Elasticity of Substitution Please Stand up?(A Comparison of the Allen/Uzawa and Morishima Elasticities)[J]. The American Economic Review, 1989, 79(4): 882-888.
- [14] Bonilla, J., J. Cora, and T. Sterner. Technical Synergies and Trade-offs between Abatement of Global and Local Air Pollution[J]. Environmental and Resource Economics, 2017, (2): 1-31.
- [15] Chambers, R. G., Y. Chung, and R. Färe. Benefit and Distance Functions[J]. Journal of Economic Theory, 1996, 70(2): 407-419.
- [16] Chung, Y. H., R. Färe, and S. Grosskopf. Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach[J]. Journal of Environmental Management, 1997, (3): 229-240.
- [17] Coggins, J. S. and J. R. Swinton. The Price of Pollution: A Dual Approach to Valuing SO<sub>2</sub> Allowances[J]. Environmental Economics and Management, 1996, (30): 58-72.
- [18] Du, L., A. Hanley, and N. Zhang. Environmental Technical Efficiency, Technology Gap and Shadow Price of Coal-fuelled Power Plants in China: A Parametric Meta-frontier Analysis[J]. Resource and Energy Economics, 2016, 43: 14-32.
- [19] Färe, R., S. Grosskopf, C. Lovell, and S. Yaisawarng. Derivation of Shadow Prices for Undesirable Outputs: A Distance Function Approach[J]. The Review of Economics and Statistics, 1993, (2): 374-380.
- [20] Färe, R., S. Grosskopf, D. Noh, and W. Weber. Characteristics of a Polluting Technology: Theory and Practice[J]. Journal of Econometrics, 2005, (126): 469-492.
- [21] Färe, R., S. Grosskopf, and W. Weber. Shadow Prices and Pollution Costs in U.S. Agriculture[J]. Ecological Economics, 2006, (56): 89-103.
- [22] Feng, G., C. Wang, and A. Serletis. Shadow Prices of CO<sub>2</sub> Emissions at US Electric Utilities: A Random-Co-efficient, Random-Directional-Vector Directional Output Distance Function Approach[J]. Empirical Economics, 2017, (1): 1-28.
- [23] Hailu, A. and T. S. Veeman. Environmentally Sensitive Productivity Analysis of the Canadian Pulp and Paper Industry, 1959-1994: An Input Distance Function Approach[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2000, 40(3): 251-274.
- [24] Hetemaki, L. Do Environmental Regulations Lead Firms into Trouble? Evidence from a Two-stage Distance Function Model with Panel Data[R]. 1994.
- [25] Kumar, S. and S. Managi. Non-separability and Substitutability among Water Pollutants: Evidence from India[J]. Environment and Development Economics, 2011, 16(6): 709-733.
- [26] Kwon, O. S. and W. C. Yun. Estimation of the Marginal Abatement Costs of Airborne Pollutants in Korea's Power Generation Sector[J]. Energy Economics, 1999, (21): 547-560.
- [27] Lee, S., D. Oh, and J. Lee. A New Approach to Measuring Shadow Price: Reconciling Engineering and Economic Perspectives[J]. Energy Economics, 2014, 46: 66-77.
- [28] Lee, J. D., J. B. Park, and T. Y. Kim. Estimation of the Shadow Prices of Pollutants with Production/Environment Inefficiency Taken into Account: A Nonparametric Directional Distance Function Approach[J]. Journal of Environmental Management, 2002, (64): 365-375.

- [29] Lee, C. Y. and P. Zhou. Directional Shadow Price Estimation of CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> in the United States Coal Power Industry 1990–2010[J]. *Energy Economics*, 2015, 51: 493–502.
- [30] Martínez, E. R., A. P. Tadeo, and F. H. Sancho. The Calculation of Shadow Prices for Industrial Wastes Using Distance Functions: An Analysis for Spanish Ceramic Pavements Firms[J]. *Production Economics*, 2001, (69): 277–285.
- [31] Murty, M. N., S. Kumar, and K. Dhavala. Measuring Environmental Efficiency of Industry: A Case Study of Thermal Power Generation in India[J]. *Environment Resource Economic*, 2007, (38): 31–50.
- [32] Murty, M. N. and S. Kumar. Measuring Cost of Environmentally Sustainable Industrial Development in India: A Distance Function Approach[J]. *Environment Development Economics*, 2002, (7): 467–486.
- [33] Park, H. and J. Lim. Valuation of Marginal CO<sub>2</sub> Abatement Options for Electric Power Plants in Korea[J]. *Energy Policy*, 2009, (37): 1834–1841.
- [34] Wang, Q., Q. Cui, D. Zhou, and S. Wang. Marginal Abatement Costs of Carbon Dioxide in China: A Non-parametric Analysis[J]. *Energy Procedia*, 2011, (5): 2316–2320.
- [35] Xie, H., M. Shen, and C. Wei. Technical Efficiency, Shadow Price and Substitutability of Chinese Industrial SO<sub>2</sub> Emissions: A Parametric Approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 1386–1394.

## Estimating Shadow Price of Papermaking Enterprise Pollutions: Based on Parametric Directional Distance Function

Wang Bing, Zhu Xiaolei and Du Minzhe

(Department of Economics, Jinan University)

**Abstract:** Under the trend of the increasingly serious environmental pollution in China, the construction of pollutant emission trading market and its market price determination is the key to effectively control pollutant emission. Using quadratic directional distance function and Morishima output elasticity of substitution, the paper estimates the shadow price of pollutant emission and output substitution elasticity for 35 paper enterprises in Dongguan during 2004–2008. The results show that the average shadow prices of COD and dust are 57 thousand yuan per ton and 28.8 thousand yuan per ton respectively. The average shadow prices of COD are dropping off generally, while that of dust does not fluctuate significantly. There is a negative relationship between the shadow prices of pollutions and the emission intensity. The larger the enterprise is, the higher the shadow price is. COD and dust have an alternative relationship, and the dust on the COD substitution gradually increased. Therefore, policy makers should consider the enterprise scale and strategies for reducing the specific pollutants emissions when evaluating the reduction effect in order to avoid the unsustainable development of emission reduction strategies by increasing emission of other pollutants to replace targeted pollutants.

**Keywords:** Shadow Prices; Output Elasticity of Substitution; Quadratic Directional Distance Function; Papermaking Enterprise

**JEL Classification:** Q56

(责任编辑:朱静静)