

基于微观模拟的企业排污强度差异及区域特征

赵楠, 刘毅, 陈吉宁

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 同一工业行业内的企业存在排污强度个体差异, 从数量有限的企业环境统计数据得出行业平均排污强度, 并用其代表该行业在区域层面的经济-环境水平, 会带来一定偏差. 因此以嵌入环境消耗投入的生产函数为基础, 建立了企业运营决策的微观模拟模型, 从机制上描述企业排污强度的差异. 以 2005 年德阳市机械制造行业为案例, 对模型的相关参数进行了率定, 使其较好地描述了 2005 年环境统计口径内各企业的 COD 排放强度. 模型的计算结果表明, 由环境统计口径内企业计算的区域平均 COD 排放强度(万元固定资产排放 0.002 6 t, 万元工业产值排放 0.001 5 t)小于由区域内全部企业计算的区域平均 COD 排放强度(万元固定资产排放 0.003 0 t, 万元工业产值排放 0.002 3 t), 市域内 6 个县级行政区的排污强度也体现出了明显差异. 以上的排污强度区域特征主要源自行业内部结构(企业的规模分布, 技术分布), 及其空间差异.

关键词: 微观模拟; 排污强度; 生产函数; 区域工业污染防治

中图分类号: X323 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)11-3190-06

Micro-simulation of Firms' Heterogeneity on Pollution Intensity and Regional Characteristics

ZHAO Nan, LIU Yi, CHEN Ji-ning

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In the same industrial sector, heterogeneity of pollution intensity exists among firms. There are some errors if using sector's average pollution intensity, which are calculated by limited number of firms in environmental statistic database to represent the sector's regional economic-environmental status. Based on the production function which includes environmental depletion as input, a micro-simulation model on firms' operational decision making is proposed. Then the heterogeneity of firms' pollution intensity can be mechanically described. Taking the mechanical manufacturing sector in Deyang city, 2005 as the case, the model's parameters were estimated. And the actual COD emission intensities of environmental statistic firms can be properly matched by the simulation. The model's results also show that the regional average COD emission intensity calculated by the environmental statistic firms (0.002 6 t per 10 000 yuan fixed asset, 0.001 5 t per 10 000 yuan production value) is lower than the regional average intensity calculated by all the firms in the region (0.003 0 t per 10 000 yuan fixed asset, 0.002 3 t per 10 000 yuan production value). The difference among average intensities in the six counties is significant as well. These regional characteristics of pollution intensity attribute to the sector's inner-structure (firms' scale distribution, technology distribution) and its spatial deviation.

Key words: micro-simulation; pollution intensity; production function; regional industrial pollution control

排污强度(单位产值或单位投资额的污染排放量)是反映一个区域(或城市)的经济发展与环境保护协调性的重要指标^[1], 同时, 在产业规划环境影响评价以及污染防治规划中, 排污强度对于工业污染排放量预测(定额法)也非常重要. 对纳入环境统计口径的工业企业进行分行业汇总, 计算平均排污强度, 再将其与未来预期的工业产值或投资额相乘^[2]. 但是, 行业的平均排污强度掩盖了企业个体之间的差异, 并且纳入统计数据库的企业往往只占全部企业的小部分, 用环境统计口径内企业的平均值代表整个区域的整体水平会存在一定偏差, 也无法体现区域内局部地区之间的差别. 这不利于从总量和空间布局^[3]的角度引导区域环境-经济的可持续发展.

Cole 等^[4]通过线性回归分析研究了企业大气污

染物排放强度的高低与企业的开业时间、规模、生产率以及环境管理政策等因素的关系. 为了从机制上描述企业排污强度的差异, 本研究以嵌入环境消耗投入的生产函数为基础建立企业运营决策的微观模拟模型, 同时结合案例, 利用该方法研究对比环境统计口径内企业与区域内全部企业平均 COD 排放强度的差异, 以及区域内局部地区间的差异.

1 研究方法

1.1 面向区域的企业微观模拟

收稿日期: 2008-12-18; 修订日期: 2009-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(40701057)

作者简介: 赵楠(1982~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为流域水污染防治, E-mail: zhaon@mails.tsinghua.edu.cn

企业微观模拟(Micro-simulation)^[5,6]的基本思想是:对每个微观企业个体决策和行为的规律进行表述,而后综合叠加来展示区域的宏观效果.对于一个区域的工业发展,可以将系统概化为由若干工业企业和政府构成:每个企业独立进行生产要素的配置决策,以追求更高的利润;政府则通过项目审批,环境监管和政策等对工业发展进行调控,以实现区域社会、经济、环境的协调发展.在微观个体的综合作用下,得到了区域的经济产出、污染排放等宏观特征,如图 1 所示.由于企业自身属性(例如投资能力、生产技术水平等)存在差异,所以即使在统一的政策或同等监管水平下,也会表现出不同的经营方式(例如资产配置、劳动力配置等),从而得到不同的经济效益和污染排放水平.由不同的企业个体累加形成的宏观产业结构、布局特点也将对政府在区域层面的决策产生影响.

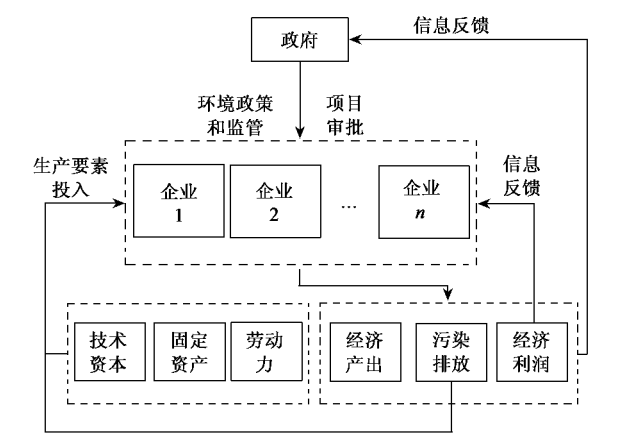


图 1 基于企业的微观模拟方法示意
Fig.1 Framework of firm-level micro-simulation

某些行业在一定的技术水平条件下,企业生产工艺的某些环节很难避免使用特定的原料、添加助剂等,若要达到一定的经济产出,必须要排放污染物,因此污染排放负荷既可以看作企业经营活动的副产品,也可看作将环境资源作为生产要素使用,即将环境消耗当作投入^[7].而且,这里的固定资产和劳动力实际都各自分别包含了用于经济生产和用于污染治理的两部分^[8],两部分的比重影响着企业的经济产出和污染排放的水平,即解释了在固定资产和劳动力总量恒定的情况下,若减少环境消耗投入(等价于增加了总固定资产或总劳动力中用于污染治理的比重,降低了用于经济生产的比重),也将减少经济产出.

1.2 嵌入环境消耗投入的企业生产函数

Cobb-Douglas 生产函数^[9]是经典的描述企业的产出与固定资产、劳动力之间关系的函数,如式(1)所示:

$$Y = F(K, L) = A'K^{a'}L^{b'} \quad (1)$$

式中, Y 为企业产出, K 为企业的固定资产, L 为劳动力投入, A' 、 a' 、 b' 为参数.若将污染排放看作企业的副产品,设 X 为经济产出, E 为污染物排放量,则:

$$Y(X, E) = F(K, L) \quad (2)$$

Coperland 等^[8]认为 K 、 L 对企业产出的贡献作用可分成用作经济产出和污染治理的两部分,两部分的相对比重由参数 θ 表示:

$$X = (1 - \theta)F(K, L) \\ E = (1 - \theta)^{1/c}F(K, L) \quad \theta \in [0, 1] \quad (3)$$

经过简单推导消去 θ ,得出:

$$X = [F(K, L)]^{1-c}E^c = A'^{(1-c)}K^{a'(1-c)}L^{b'(1-c)}E^c \\ = AK^aL^bE^c \quad (4) \\ A = A'^{(1-c)}; a = a'(1-c); b = b'(1-c)$$

因此得出将污染排放 E 看作环境消耗投入嵌入生产函数的形式,其中 A 为广义技术因子(即针对 K 、 L 、 E 的全要素生产率,包含了除 K 、 L 、 E 之外的一切其它要素对经济产出的贡献^[10]), a 、 b 、 c 分别为固定资产、劳动力、污染物排放对经济产出的弹性系数.目前已经有实证研究针对工业企业 SO_2 、 NO_x ^[11]、 COD ^[12]等排放,研究公式(4)中的参数取值及其经济、政策含义.

由于公式(3)中 θ 取值的下界是 0,所以 E 存在上界,即不采取任何污染治理措施时的排污量 E_0 .若参考 Shadbegian 等^[13]的研究,将 K 、 L 都各自划分为用于经济产出和环境治理两部分,即:

$$K = K_0 + K_e; \quad L = L_0 + L_e \quad (5)$$

式中,下标为 0 的代表用于经济产出的部分,下标为 e 的代表用作环境治理的部分,则联合公式(3)、(4),得到:

$$X = A_0K_0^{a_0}L_0^{b_0} = A(K_0 + K_e)^a(L_0 + L_e)^bE^c \quad (6)$$

$$E = \left[\frac{A_0K_0^{a_0}L_0^{b_0}}{A(K_0 + K_e)^a(L_0 + L_e)^b} \right]^{1/c} \quad (7)$$

式中, A_0 为用于经济生产的固定资产和劳动力对经济产出的技术因子,在这里称为纯经济要素生产率.将式(6)等号两边均取自然对数,得到:

$$\ln X = \ln A_0 + a_0 \ln K_0 + b_0 \ln L_0$$

$\ln X = \ln A + a \ln K + b \ln L + c \ln E \quad (8)$

通过对某特定行业中多家企业的现状数据进行多元线性回归,可以得到 a_0 、 b_0 、 a 、 b 、 c 的值,作为代表该行业内所有企业共性特征的参数^[14]. 由于公式(6)也可写作:

$$\begin{aligned} A_0 &= X/(K_0^{a_0} L_0^{b_0}) \\ A &= X/(K^a L^b E^c) \end{aligned} \quad (9)$$

即可得出同一行业内各企业技术因子的差异,且显然 A 与 A_0 相关. 由计算过程及经济学含义可知: A 、 A_0 的量纲由 X 、 K_0 、 L_0 、 E 等变量各自所用量纲(文中分别为万元、万元、人、t)综合决定,不易清晰表达;对本研究而言,比较不同企业技术因子的相对大小比确定每个企业技术因子的绝对数值更有意义. 因此本文不对 A 、 A_0 的量纲进行具体表达.

当 $K_e = 0$; $L_e = 0$ 时,由(7)可得到 E 的上界:

$$E_0 = \left[\frac{A_0 K_0^{a_0-a} L_0^{b_0-b}}{A} \right]^{1/c} \quad (10)$$

1.3 基于利润最大化的企业运营决策

若企业在实际运营过程中分阶段决策,依次追求若干生产要素的优化配置^[8](而非一次性统筹优化配置所有生产要素),则第一步:在当地政府的审批下,确定了企业全部用于经济生产的初始投资规模 K_0 ,继而企业确定该投资规模所需的劳动力 L_0 . 第二步:在政府的环境监管下,企业决策 COD 污染排放水平,即决策增加用于污染治理的固定资产投资 K_e 和劳动力投入 L_e 的量,运营利润表示为经济产出与所有劳动力使用成本,所有固定资产使用成本, COD 排放所需付出的代价之差^[8,15]:

$$\text{Max } X - wL - iK - rE \quad (11)$$

即:

$$\begin{aligned} &\text{Max } A_0 K_0^{a_0} L_0^{b_0} - w(L_0 + L_e) - i(K_0 + K_e) \\ &- r \left[\frac{A_0 K_0^{a_0} L_0^{b_0}}{A(K_0 + K_e)^a (L_0 + L_e)^b} \right]^{1/c} \end{aligned} \quad (12)$$

$K_e \in [0, +\infty]$; $L_e \in [0, +\infty]$

式中, w 为单位劳动力的平均工资; i 为固定资产折旧率; r 为单位 COD 排放量的经济代价,是由环境监管的方式和水平(排污收费、税,罚款以及行政监察力度等^[16]),以及污染处理技术决定的参数. 由公式(12)的最优解 $E^*(K_e^*, L_e^*)$ 可以得出企业的排污强度(单位固定资产投资的 COD 排放量 P_1 ,或者单位工业产值的 COD 排放量 P_2):

$$P_1 = E^*/K; \quad P_2 = E^*/X \quad (13)$$

1.4 模型的验证和应用

1.4.1 模型验证

首先,已知 2005 年纳入环境统计企业的用于经济生产的固定资产投资规模 K_0 和劳动力配置 L_0 , 产值 X ,以及用于污水治理的资产投资 K_e , 环保职工 L_e . 利用公式(8)、(9)求出行业的 a_0 、 b_0 、 a 、 b 、 c 以及各企业的 A_0 和 A ,同时拟合 A 与 A_0 的关系. 其次,对于公式(12),参数 w 取统计年鉴中工业行业的平均工资水平, i 参照会计标准,统一取 10%. 因为参数 r 是多种信息(无法一一获得)的综合体现,无法直接给出其取值,所以通过环境统计口径中企业的实际 COD 排放量来率定:得到最佳 r 的判别依据为用(12)模拟的各企业 COD 排放量与实际排放量的均方根误差(root mean square error)最小:

$$\text{Min RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (E_m^s - E_m^r)^2}{m}} \quad (14)$$

式中, E^s 为模型模拟值, E^r 为真实值, m 为企业个数. 而后,将最佳的 r 代入式(12)、(13)中计算环境统计口径内企业的 COD 排放强度(P_1 、 P_2),并观察对比模拟值与真实值的趋势.

1.4.2 模型应用

已知区域内所有企业的固定资产投资规模 K_0 和劳动力配置 L_0 ,根据式(9)求得 A_0 ,由 A 与 A_0 的拟合关系求出各企业的 A ,将率定出的 r 代入式(12)进行最优化运算,计算式(13)所示的区域内所有企业各自的 COD 排放强度. 区域 COD 平均排放强度即为企业排污量之和除以投资或产值之和.

2 案例研究

2.1 基础数据与模型验证

以四川省德阳市的重点行业(机械制造业)为案例,以该市 2005 年环境统计数据库中 17 家排污企业的数据为基础,利用 SPSS 软件,基于公式(8)进行线性回归,得到弹性系数,如表 1 所示.

表 1 机械制造业弹性系数计算结果					
Table 1 Elastic coefficients of the mechanical manufacturing sector					
线性回归结果	系数 a_0	系数 b_0	系数 a	系数 b	系数 c
机械制造	0.262	0.749	0.435	0.291	0.215
相关系数(R^2)	0.833		0.880		

由式(9)计算出 A_0 、 A ,发现两者呈现明显的线性关系,如图 2 所示.

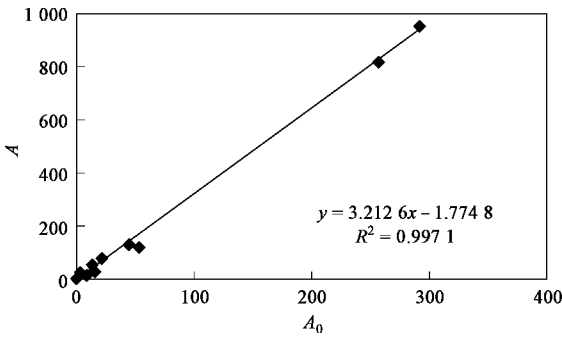


图2 机械制造行业纯经济要素生产率与全要素生产率的关系
Fig.2 Relationship between economic factor productivity and total factor productivity of the mechanical manufacturing sector

给出在一定区间内递增的 r 序列,采用 Matlab 软件的非线性最优化程序求解式(12),得出 r 与式(14)中 RMSE 的关系,得到使 RMSE 取最小值的 r 为95 400 元/t.此时模拟出环境统计口径内各企业的单位固定资产和单位工业产值的 COD 排污量,并与真实值进行比较,如图 3 所示.

可以看出,尽管个别企业 COD 排放强度的模拟值与真实值略有差别,但模型已经在一定程度上反映了企业由于自身属性(初始固定资产投资规模 K_0 ,劳动力配置 L_0 ,技术因子 A_0)差异而引起排污强度差异的规律.

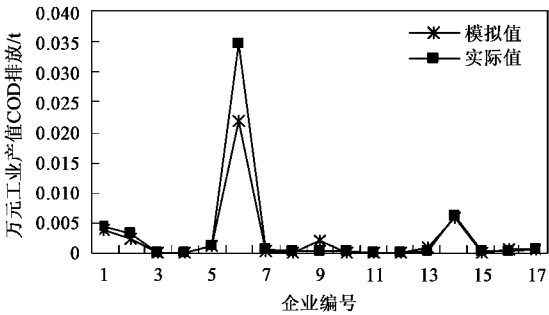
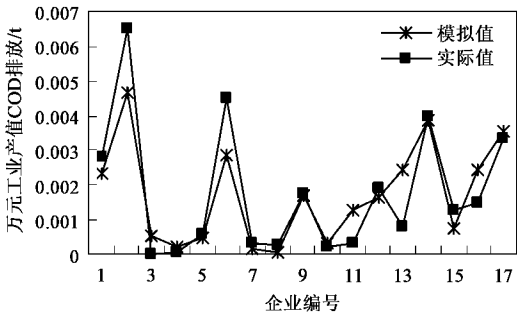


图3 机械制造行业纳入环境统计的企业 COD 排放强度模拟
Fig.3 Simulated COD emission intensity of environmental statistic firms in the mechanical manufacturing sector

2.2 区域特征计算与分析

德阳市机械制造行业在 2005 年实际共有 575 家企业,它们的 K_0 、 L_0 、 A_0 可得.将环境统计数据库

内的企业与全市区域内所有企业进行对比,可看出 2 组企业针对 K_0 、 A_0 的插值概率分布都存在差异,如图 4 所示.

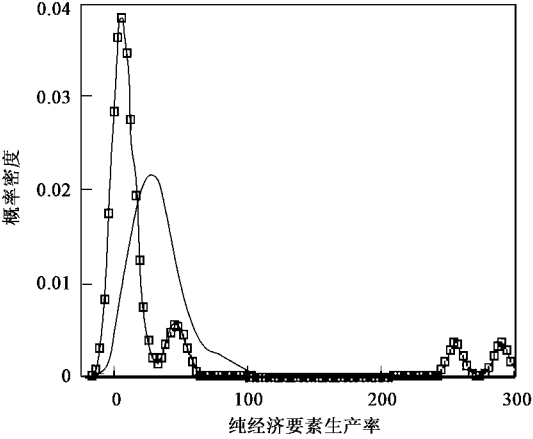
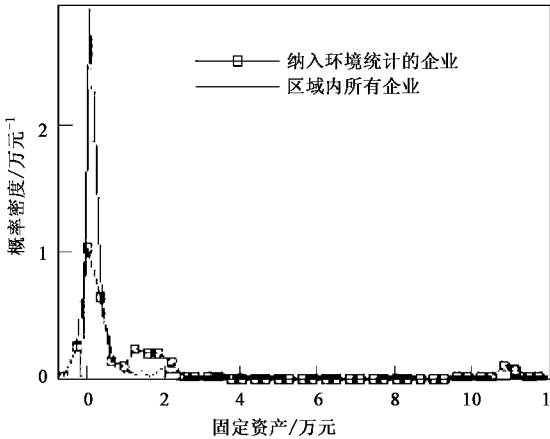


图4 环境统计口径内企业与区域内全部企业属性的概率分布特征差异(分别对于初始固定资产和纯经济要素生产率)
Fig.4 Probability distribution difference between environmental statistic firms and all the firms in the region, respectively on the initial fixed asset and economic factor productivity

环境统计口径内企业 K_0 的均值为28 321万元,标准差为73 236万元,区域内所有企业 K_0 均值为

4 583万元,标准差为15 397万元,环境统计口径内企业 L_0 的均值为1 464人,标准差为3 043人,区域内所

有企业 L_0 均值为 60 人,标准差为 493 人.环境统计口径内企业 A_0 的均值为 41.3,标准差为 88.3,区域内所有企业 A_0 均值为 35.9,标准差为 35.2. 因此,环境统计企业主要代表了区域所有企业中规模较大、技术水平较高的部分,环境统计口径内的企业之间也存在更加显著的差异.环境统计口径纳入了区域内规模最大的几家(前三大企业的投资规模占环境统计企业之和的 88%),以及技术水平最高的几家,却忽视了区域内实际存在大量中、小规模企业,以及技术处于中低水平的企业.

同时,区域内所有企业的 K_0 和 A_0 在 0.01 显著水平上呈现一定的正相关性(Pearson 相关系数为 0.152),而该相关性分析在针对环境统计企业时并不显著.说明区域内所有企业具有投资规模越大,技术水平越高的趋势,而实际上环境统计口径内的企业的投资规模大小和技术水平并不存在明显的关联.

由于环境统计口径内企业的属性特征无法完全代替区域内所有企业,因此用环境统计口径企业计算的区域 COD 平均排放强度必然与由区域内所有企业计算的平均排污强度存在差异.通过模型计算的排污强度结果如表 2 所示.

表 2 机械制造业平均 COD 排污强度模拟结果

Table 2 Simulated average COD emission intensity of the mechanical manufacturing sector

排污强度指标/t	纳入环境统计的企业	区域内全部企业
万元固定资产 COD 排放(P_1)	0.002 6	0.003 0
万元工业产值 COD 排放(P_2)	0.001 5	0.002 3

2 个排污强度指标(P_1 、 P_2)体现出:由纳入环境统计的企业计算的平均 COD 排放强度低于由区域内所有企业计算的平均排污强度.而且,2 组企业 P_1 的差距小于 P_2 . 在产业规划环评或污染防治规划中,若采用定额法,依据区域内该行业预期的固定资产总投资规模或经济总产值估算 COD 排放总量,使用纳入环境统计企业平均排污强度的估算结果比使用区域内全部企业平均排污强度的估算结果将减少 13.3%和 34.8%.

对于区域内全部企业,按照所属县级行政区分别计算各地区平均排污强度,结果如图 5 所示.可见,对于 2 个排污强度指标,什邡的平均排污强度都是最高的.绵竹的平均排污强度较低.若采用定额法估算各县级行政区的 COD 排放量,对于 2 排污强度指标,使用环境统计口径内企业平均排污强度的结

果与使用图 5 所示各地区排污强度的结果相比:旌阳区将减少 17.4%和 36.8%;罗江县将减少 11.1%和 45.2%;绵竹市将减少 -4.6%和 19.8%;什邡市将减少 32.8%和 56.0%;中江县将减少 23.8%和 14.5%;广汉市将减少 16.5%和 33.1%.

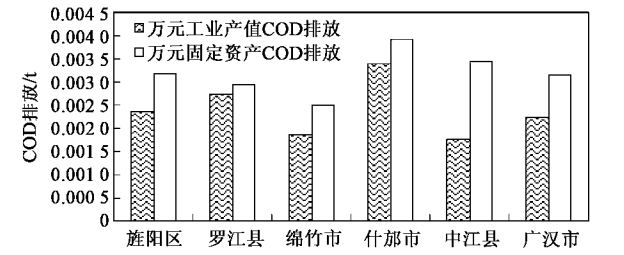


图 5 机械制造业分县级行政区的平均 COD 排放强度模拟结果

Fig.5 Mechanical manufacturing sector's simulated average COD emission intensity of counties

区域(城市)某一行业中,企业规模和技术水平属性的分布特征代表着该行业的内部结构^[17],这是由当地的产业政策(是否倾向于大项目、集约型投资)、工业发展阶段(技术进步、技术扩散过程^[18])等因素决定的,这些因素的改变影响着区域总体排污强度.同时,由于区域内不同地理单元的区位^[19](交通条件、文化教育水平、产业集聚效应等)差异,企业的规模和技术水平分布也具有空间特征,因此区域的排污强度也体现出了空间差异性.

3 结论

- (1) 基于微观模拟的思想,通过建立嵌入环境消耗投入的企业生产函数,以及企业追求利润最大化的污染治理投入最优化模型,可以描述区域(城市)的工业行业内企业 COD 排污强度的差异,该差异主要是由各企业不同的规模(固定资产、劳动力)和技术水平属性造成的.
- (2) 将该方法应用于 2005 年德阳市机械制造业的研究表明:该地区环境统计口径内企业的平均排污强度低于研究区域内全部企业的平均排污强度.而且,排污强度在不同的县级行政区表现出不同的水平.因此,在进行区域规划环评或污染防治规划的过程中,需要考虑用环境统计数据库内的工业企业代表区域内整个行业时所引起的行业内部结构(企业规模分布、技术分布)偏差,同时也应注意到行业内部结构在各地地理单元的差异.
- (3) 该研究方法的机制中所考虑的企业投资规模、环境管理、技术水平等因素与现实中的产业结构

政策, 环境经济、技术政策, 以及区域发展规划密切相关. 所以该方法在规划、政策环境影响的预测和评估方面也有进一步研究的必要.

参考文献:

- [1] 王腊春, 霍雨, 朱继业, 等. 区域经济发展与污水排放协调分析[J]. 环境科学, 2008, **29**(3): 593-598.
- [2] Oketola A A, Osibanjo O. Estimating sectoral pollution load in Lagos by Industrial Pollution Projection System (IPPS) [J]. Sci Total Environ, 2007, **377**(2-3): 125-141.
- [3] 刘毅, 陈吉宁, 何炜琪, 等. 基于不确定性分析的城市总体规划环评方法与案例研究[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(4): 566-571.
- [4] Cole M A, Elliott R J R, Shimamoto K. Industrial characteristics, environmental regulation and air pollution: An analysis of the UK manufacturing sector [J]. J Environ Econ Manage, 2005, **50**(1): 121-143.
- [5] Ballas D, Kingston R, Stillwell J, *et al.* Building a spatial microsimulation-based planning support system for local policy making [J]. Environ Plann, 2007, **39**: 2482-2499.
- [6] Wissen L. A micro-simulation model of firms: Applications of concepts of the demography of the firm [J]. Reg Sci, 2000, **79**(2): 111-134.
- [7] Fare R, Grosskopf S, Pasurka J C A. Environmental production functions and environmental directional distance functions [J]. Energy, 2007, **32**: 1055-1066.
- [8] Copeland B R, Taylor M S. Trade and the environment: Theory and evidence [M]. Princeton: Princeton University Press, 2003. 12-30.
- [9] 高鸿业. 西方经济学[M]. (第二版). 北京: 中国人民大学出版社, 2000. 140-151.
- [10] 李双杰, 左宝祥. 全要素生产率测度方法评析[J]. 经济师, 2008, **5**: 15-16.
- [11] Keilbach M. Estimation of the value of the marginal product of emission in a country where emissions output is regulated- an empirical study [J]. Environ Resour Econ, 1995, **5**: 305-319.
- [12] Dean J M, Lovely M E, Wang H. Foreign direct investment and pollution havens: Evaluating the evidence from China [R]. Washington, DC: US International Trade Commission, 2003.
- [13] Shadbegian R J, Gray W B. Pollution abatement expenditures and plant-level productivity: A production function approach [J]. Ecol Econ, 2005, **54**(2-3): 196-208.
- [14] 肖耀球. 技术进步机理与数量分析方法[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002. 99-117.
- [15] Sakellaris P. Patterns of plant adjustment [J]. J Monetary Econ, 2004, **51**(2): 425-450.
- [16] Dasgupta S, Laplante B, Mamingi N, *et al.* Inspections, pollution prices, and environmental performance: Evidence from China [J]. Ecol Econ, 2001, **36**(3): 487-498.
- [17] 白文扬, 李雨. 我国工业产业集中度实证研究[J]. 中国工业经济研究, 1994, **11**: 45-50.
- [18] Barreto L, Kemp R. Inclusion of technology diffusion in energy-system models: Some gaps and needs [J]. J Clean Prod, 2008, **16**(1): 95-101.
- [19] Weber A. Theory of the location of industries [M]. Chicago: The University of Chicago Press, 1929.