

基于源解析法的大气中 PAHs 污染排污收费模型

崔 嵩¹, 李一凡¹⁻³, 马万里¹, 郭 亮⁴, 田崇国⁵, 安立会⁶, 贾宏亮², 刘宪杰²

(1. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室 国际持久性有毒物质联合研究中心, 150090 哈尔滨,

cuisong-bq@163.com; 2. 大连海事大学 国际持久性有毒物质联合研究中心, 116023 辽宁 大连;

3. 加拿大环境部科学技术局, 加拿大, 多伦多 M3H 5T4; 4. 哈尔滨工业大学 管理学院, 150001

哈尔滨; 5. 中国科学院 烟台海岸带研究所, 264003 山东 烟台;

6. 中国环境科学研究院 河流与河口海岸创新基地, 100012 北京)

摘 要: 为降低人类面临的健康威胁和多环芳烃污染的致癌风险, 规避生产企业的生产及排放行为, 通过源解析技术, 确定大气中多环芳烃类污染物来源的排放企业类型, 并应用二层规划的系统优化理论, 给出价格控制下的排污收费二层规划模型。模型中上层决策单位是政府(环境保护部门), 下层决策单位是产生有毒有害污染物的生产企业。在某种程度上, 该模型解决了以往排污收费问题中存在的政府部门与排污企业间较大的信息不一致问题, 可以更好地控制排污企业的生产排放行为, 改善大气环境质量。

关键词: 价格控制; 多环芳烃; 源解析; 排污收费

中图分类号: X323

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)12-0096-04

Source apportionment to determine the penalty charges on air emission of polycyclic aromatic hydrocarbons

CUI Song¹, LI Yi-fan¹⁻³, MA Wan-li¹, GUO Liang⁴, TIAN Chong-guo⁵,

AN Li-hui⁶, JIA Hong-liang², LIU Xian-jie²

(1. International Joint Research Center for Persistent Toxic Substances, State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, cuisong-bq@163.com; 2. International Joint Research

Center for Persistent Toxic Substances, Dalian Maritime University, 116023 Dalian, Liaoning, China; 3. Science and Technology Branch, Environment Canada, Ontario M3H 5T4, Canada; 4. School of Management, Harbin Institute

of Technology, 150001 Harbin, China; 5. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences,

264003 Yantai, Shandong, China; 6. State Environmental Protection Key Laboratory of Estuarine and Coastal

Research, Chinese Research Academy for Environment Sciences, 100012 Beijing, China)

Abstract: To reduce air emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), which impose health threats and risk of cancer to humans, it is necessary to control the behavior of production and emission of enterprise, and by source apportionment, it is possible to make sure the PAHs emissions type of discharge contamination enterprises. By applying bilevel decision-making theories and methods of a hierarchy system, this paper presents bilevel decision models to collect charges due to emission of PAHs for different decision-makers of upper-level government and lower-level enterprises. This model has in some degree solved the inconsistent information happened in previous studies between government and enterprises, and can be used to better control the PAH emissions from enterprises and improve the air quality.

Key words: price control; polycyclic aromatic hydrocarbons; source apportionment; effluent charges

收稿日期: 2010-06-22.

基金项目: 城市水资源与水环境国家重点实验室自主课题项目
(2008DX01).

作者简介: 崔 嵩(1981—), 男, 博士研究生;

李一凡(1949—), 男, 教授, 博士生导师.

多环芳烃(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)作为环境中一种普遍存在的持久性有机污染物(POPs), 具有长距离迁移性、生物富集性等

特点,且有些 PAHs 还具有“三致”效应.PAHs 的来源主要为天然源和人为源,天然源主要为自然界中动植物的合成,数量有限.除了天然源外,由于人类的生产活动导致的燃料不完全燃烧是 PAHs 产生的主要途径^[1-3].PAHs 广泛存在于大气、土壤、植物、水体和沉积物等环境介质中,可以通过皮肤接触、呼吸作用及食物链进入人体,并对人体造成潜在的危害,因此,开展 PAHs 的研究、确定其来源途径,从而控制 PAHs 的排放数量及方式,对环境影响评价具有重要意义^[4-6].

排污收费标准的制定是影响排污收费定价的主要因素^[7-9]，“排污收费的最优定价”一度成为较关注的问题之一.排污收费原本隶属于环境税的征收范畴,国内外普遍采用的研究方法是应用边际外部成本和边际控制成本来使排污税率达到最优化,但该方法存在着严重的信息不一致性缺陷,从而使排污收费制度在具体的实施过程中很难达到理想的效果,一般只能使污染控制趋近于最优控制水平^[10].因此,针对在具体应用时存在着信息不对称以及不能进行信息交互等问题的最优 Pigovian 定价方法,通过源解析技术对大气中 PAHs 的污染源进行确定,以文献[2]报道的 2007 年春季哈尔滨地区大气中多环芳烃为例,从环境复杂系统层次结构的角度提出了针对 PAHs 污染排放企业的排污行为,试图制定排污收费的二层最优收费定价问题及其模型以控制企业的排污行为,减少企业的排放量,从而使大气污染降到最低水平,减少人类健康面临的潜在威胁.

1 研究方法

1.1 源解析技术及多环芳烃污染特征分析

1.1.1 源解析技术

源解析技术研究方法是在大气颗粒污染物来源解析技术的基础上^[11],根据持久性有机污染物(POPs)的环境行为而发展起来的.PAHs 以气态和颗粒态两种形式存在于大气环境中,其中,颗粒态是气态 PAHs 通过与大气中的气溶胶进行吸附/解析的交换过程而存在的一种形式.因此,利用被动采样器进行大气样品的采集^[12],进行样品的分析处理,以获得大气中 PAHs 的质量浓度数据,并进行定性或定量的分析来确定污染源的类型.

PAHs 在环境中存在很多污染源,通常污染源不同所产生的 PAHs 的特征也不同,利用这种差异来对 PAHs 的来源进行判断是常用的方法.比值法是根据所采集的样品中污染物残留比例与污染物成分的比例对比来进行定性分析来源的方

法,应用比值法判定特征化合物质量浓度是最常用的一种辨别大气中 PAHs 污染源的定性方法.一般方法是以芴(fluorine)、芘(pyrene)、茚苯芘(Indeno(1,2,3-cd)pyrene)和苯并(ghi)北(Benzo(g,hi)perylene)之间的比值来进行来源判定,如 $\rho(\text{Flu})/(\rho(\text{Flu})+\rho(\text{Pyr}))$ 和 $\rho(\text{IcdP})/(\rho(\text{IcdP})+\rho(\text{BghiP}))$ 常用来判定大气中 PAHs 来自于燃煤或者油类、植物等不完全燃烧的排放.一般情况下,当 $\rho(\text{Flu})/(\rho(\text{Flu})+\rho(\text{Pyr}))>0.5$ 时,PAHs 来源为燃煤或者生物质不完全燃烧的排放, $\rho(\text{Flu})/(\rho(\text{Flu})+\rho(\text{Pyr}))<0.4$ 时,则 PAHs 来源于石油不完全燃烧的排放, $\rho(\text{Flu})/(\rho(\text{Flu})+\rho(\text{Pyr}))$ 介于 0.4 和 0.5 时则表明来自于液化化石燃料不完全燃烧的排放;当 $\rho(\text{IcdP})/(\rho(\text{IcdP})+\rho(\text{BghiP}))>0.5$ 时,也表明 PAHs 来源为燃煤或者生物质不完全燃烧的排放^[13].另有根据苯并(a)芘(Bap)和晕苯(Cor)的比值进行判断的研究,一般认为,当 $\rho(\text{Bap})/\rho(\text{Cor})>1$ 时,为燃煤排放源;当 $\rho(\text{Bap})/\rho(\text{Cor})<1$ 时为燃油排放源^[14].

化学质量平衡(CMB)模型作为源解析的一种定量研究方法,已被美国环保署(USEPA)推荐为大气颗粒物来源解析的重要方法之一.该模型是通过污染源和大气颗粒物的化学组成来构建线性方程组,从而解析污染源并定量污染源的贡献率.于娜等曾用此方法对北京城区和郊区大气的细粒子有机物的污染特征进行了来源解析^[15].

1.1.2 PAHs 的污染特征

本文以文献[2]采集的大气中质量浓度数据为依据,应用比值法对哈尔滨大气中 PAHs 的来源进行解析,得出 $\rho(\text{IcdP})/(\rho(\text{IcdP})+\rho(\text{BghiP}))$ 和 $\rho(\text{Flu})/(\rho(\text{Flu})+\rho(\text{Pyr}))$ 的平均比值分别为 0.53 ± 0.01 和 0.59 ± 0.05 .以此可以判断出哈尔滨地区大气中 PAHs 主要来自于燃煤和生物质燃烧的排放,由于该研究采样时间正处于供暖期,在市区内主要通过燃煤进行供暖,而在农村地区则主要靠燃烧秸秆取暖,所以,排放源可能相对集中于燃煤供暖和生物质不完全燃烧的排放.

因此,对于以哈尔滨市为典型特征的我国北方城市,冬季供暖期,由于大量燃煤不完全燃烧排放的 PAHs 进入大气中,会使大气中有害污染物大量增加,对人类的健康可能存在较大的潜在威胁.近年来的研究表明,在全球范围内,均充斥着低质量浓度工业有毒有害污染物^[16].有毒污染物的排放呈累积趋势,在世界范围内对人类健康和生态系统产生危害.国外的类似调查说明,城市肺

癌死亡率高于农村^[17].

为减轻人类的健康风险,减少大气中有毒有害污染物的质量浓度,从而降低癌症的发病率,政府就需要重点考虑环境资源最佳分配方式、社会福利函数问题和企业对外部环境造成的危害等亟待解决的问题,通过制定合理且有效排污收费的策略,迫使污染物排放企业在政府(环境保护部门)公布排污收费价格之后,控制企业本身的排放行为,通过技术的改造和提升,提高燃料的燃烧效率,尽量减少污染物的排放量,同时,使其对外部环境造成的损害成本(或赔偿成本)降至最低,从而减少大气环境污染给人类健康带来的威胁.

1.2 排污收费模型

1.2.1 价格控制问题

价格控制问题由 Bialas^[18]最早提出,通常是一类比较特殊的二层线性规划(Bilevel Linear Programming)问题.二层线性规划问题的一般形式分为两部分,即资源控制问题和价格控制问题,其一般表述形式分别为 $\max_{\mathbf{x}} f_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = (\mathbf{a}^T \mathbf{x} + \mathbf{b}^T \mathbf{y})$ 和 $\max_{\mathbf{y}} f_2(\mathbf{x}, \mathbf{y})$,二者在约束条件 $\mathbf{Ax} + \mathbf{By} \leq \mathbf{r}, \mathbf{x}, \mathbf{y} \geq 0$ 下有可行解.式中:上级决策变量 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{n_1})^T \in R^{n_1}$;下级控制决策的决策变量 $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_{n_2})^T \in R^{n_2}$, $\mathbf{a} \in R^{n_1}$, $\mathbf{b} \in R^{n_2}$, $\mathbf{A}$ 为 $m \times n_1$ 阶矩阵, $\mathbf{B}$ 为 $m \times n_2$ 阶矩阵.有关价格控制问题的主要研究成果见文献[19-22].

实际上,通常将非线性的价格控制问题转化为线性问题进行处理,即价格控制问题由两个决策者构成:价格的控制者(上级,即政府部门)和生产者(下级,即排放企业).在不同的价格控制下,生产者往往为了企业自身的生存发展,寻找对他“最有利”的生产规模,即使企业的利润最大化,而不考虑其生产行为所造成的环境影响,此时,就需要政府部门制定价格标准来控制其生产排放行为,减少其排放行为所造成的环境污染.

1.2.2 排污收费模型的构建

基于价格控制的排污收费二层规划模型的构建方法为:设不同行业(供暖、冶炼等)进行生产活动,由于其企业自身燃料的燃烧效率不高,而导致不完全燃烧所排放的 n 种大气污染物的外部成本价为 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ (由政府环保部门控制);则各行业污染物的排放量为 $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)^T$ (由污染物排放企业控制).

环保部门通过一定比例来收税时,其比例分数为 $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$.通常,生产企业排出的污染物对环境造成的危害越大,外部成本越高,相

应的比例系数也越大.若按企业的年度排污量比例征收,则相应的比例分数为 $\mathbf{b} = (b_1, b_2, \dots, b_n)^T$.一般情况下,对排放污染物越多,即排污越严重的企业,相应所采用的比例系数也越大.

政府环保部门可以根据国家或不同地区的经济发展、环境容量等具体情况,采取不同的方式进行控制,通常所采取的控制方式分为:(1)严厉的收费政策,针对环境质量相对较差地区的企业,即大气污染比较严重地区的企业,按最大值进行排污收费;(2)温和的收费政策,针对环境质量相对较好地区的企业,按最小值进行排污收费.模型的详细研究见文献[23-24].

与传统 Pigovian 定价方法相比,该模型的主要特点体现在:上下级决策者之间能够进行充分的信息分享,具有信息交互性特点,下级在上级给定价格的情况及范围内,拥有自主决策权,即下级拥有弹性调节权;下级的决策也会影响上级决策的制定,即上级拥有价格调整权;同时,上下级决策者受制于相同的约束条件,常构成相关联的整体.

1.2.3 模型的求解

实际上,二层规划问题是非线性的,但为了便于求解,往往将其当成线性问题来进行处理.常用的求解方法有搜索算法、遗传算法、罚函数法、K 次最好法、模拟退火算法等^[23,25-26],也有将价格控制问题转化为与其等价的具有等式和不等式的单层数学规划并用精确罚函数进行求解的研究^[27].

1.3 结果与讨论

生产企业的目标是追求其利润的最大化,这就势必会使企业的生产行为有违公众的利益,并与政府的目标相违背.基于价格控制的构成,当价格的控制者(上级)与价格的执行者(下级)存在目标不一致时,即在不同价格的情况下,生产者总是试图寻找对其“最有利”的生产规模,即在利益的驱动下,使其产值在客观条件下达到最大,而上级决策者则应根据下级的反应做出对其来说最好的价格,以此来进一步控制企业的生产排放行为,即价格控制是动态的,只有根据企业的生产行为来不断地调整排污收费的价格,才能达到真正控制企业排放的目的.另外,当企业的排放行为对环境的危害过大,导致其外部成本过高时,生产企业自身也会控制其生产行为,从而减少其污染物的排放.

2 结 论

1)根据大气中多环芳烃的实际监测质量浓度,应用源解析技术中的特征比值法,确定多环芳

烃的污染源,并应用价格控制下的排污收费模型来控制污染物排放企业的行为,由于该模型具有信息交互的特点,避免了传统 Pigovian 定价方法中存在的信息不对称问题。

2) 由于该模型求解方法较为复杂,只列出了一些较有代表性的算法,具体的全局最优解还有待进一步深入研究。

3) 该模型不仅可以应用于燃煤企业的排污控制,还可对石油化工等相关企业的排污进行控制,以此规避企业的生产行为,减少其排污量,达到减少大气中有毒有害污染物质量浓度的目的,从而降低大气环境的变化给人类健康带来的潜在威胁,降低致癌风险。

参考文献:

- [1] ROGGE W F, HIDE MANN L M, MAZUREK M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 9. Pine, oak, synthetic log combustion in residential fireplaces[J]. *Environ Sci Technol*, 1998, 32:13-22.
- [2] 马万里,李一凡,孙德智,等.哈尔滨市大气气相中多环芳烃的研究[J].*环境科学*,2009,30(11):49-54.
- [3] ZHANG Yanxu, TAO Shu, SHEN Huizhong, *et al.* Inhalation exposure to ambient polycyclic aromatic hydrocarbons and lung cancer risk of Chinese population[J]. *PNAS*, 2009,106(50):21063-21067.
- [4] WANG X P, XU B Q, KANG S C, *et al.* The historical residue trends of DDT, hexachlorocyclohexanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in an ice core from Mt. Everest, central Himalayas, China[J].*Atmos Environ*, 2008, 42(27):6699-6709.
- [5] HUNG H, BLANCHARD T P, HALSALL C J, *et al.* Temporal and spatial variabilities of atmospheric polychlorinated biphenyls (PCBs), organochlorine (OC) pesticides and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Canadian Arctic: results from a decade of monitoring [J]. *Sci Total Environ*, 2005, 342(1/3): 119-144.
- [6] SIMCIK M F, EISENREICH S J, LIO Y P J. Source apportionment and source/sink relationships of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan[J].*Atmos Environ*, 1999, 33 (30):5071-5079.
- [7] 傅国伟,王永航. 排污收费标准制定理论及技术研究[J].*环境科学学报*,1997,17 (3): 378-382.
- [8] BAUMOLW J. On taxation and the control of externalities[J]. *American Economic Review*,1972, 62 (3): 307-322.
- [9] SCHRAMM G, WARFORD J J. Environmental management and economic development [M]. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 1989.
- [10] 李磊,李圭白.双级决策的排污收费模型[J].*哈尔滨工业大学学报*,2005,37(12):1637-1639.
- [11] 方旋,耿长君,徐友海,等. 污染物的源解析技术研究进展[J]. *化工科技*, 2007,15(3):60-64.
- [12] SHOEIB M, HARNER T. Characterization and comparison of three passive air samplers for persistent organic pollutants[J]. *Environ Sci Technol*, 2002, 36(19): 4142-4151.
- [13] YUNKER M B, MACDONALD R W, VINGARZAN R, *et al.* PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. *Org Geochem*, 2002, 33(4): 489-515.
- [14] SIMICIK M F, EISENREICH S J, LIOY P J. Source apportionment and source/sink relationship of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and lake Michigan [J]. *Atmos Environ*, 1999,33:5071-5079.
- [15] 于娜,魏永杰,胡敏,等. 北京城区和郊区大气细粒子有机污染物污染特征及来源解析[J]. *环境科学学报*,2009,29(2):243-251.
- [16] HESTER T. Organization for economic cooperation and development[M].New York: Harremoes, 2001: 17-36.
- [17] 蔡宏道.现代环境卫生学[M].北京:人民卫生出版社,1995:429-432.
- [18] BIALAS M, KANWAN H. Two-level linear programming[J].*Management Science*,1994,8(3):95-99.
- [19] 阮国桢,杨丰梅,汪寿阳.线性双级价格控制问题的单纯形法[J].*系统工程理论与实践*,1996,16(12): 38-43.
- [20] 周水生,刘三阳.价格控制问题的基本性质[J].*应用数学与计算数学学报*,1998,12(2):53-58.
- [21] 滕春贤,李智慧.二层规划的理论与应用[M].北京:科学出版社,2002:22-44.
- [22] 刘志勇,滕春贤,陈东彦.双级价格控制问题的研究 [C]//中国运筹学会第七届学术交流会议论文集(下卷). Hong Kong: Global-Link Publishing Company, 2004:1302-1308.
- [23] 李磊.环境资源价值的价格策略[D]. 天津:天津大学,2004:34-36.
- [24] 李煜华,张铁男,孙凯. 基于价格控制的排污收费二层线性规划模型[J].*统计与决策*,2008,11:41-43.
- [25] 林丹,王宏,李敏强.用多目标进化算法求解二层规划双目标模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2006(5): 106-110.
- [26] 杜文,黄崇超.求解二层规划问题的遗传算法[J].*数学杂志*,2005,25(2):167-170.
- [27] 滕春贤,姚锋敏,陈东彦.价格控制问题精确罚等价形式研究[J].*黑龙江大学自然科学学报*,2007,24(1):10-15.