

区域二氧化硫控制优化模型研究

王 青¹ 邹 骥¹ 王 磊²

(1. 中国人民大学环境学院, 北京 100872; 2. 济南供电公司, 济南 250012)

摘要 传统的区域二氧化硫控制优化都是基于损害函数法和环境标准化法的, 本文在分析比较了传统二氧化硫污染控制战略优化中的损害函数法和环境标准化法各自的优点与局限的基础上, 建立了基于时间序列决策的整数规划优化模型。这一理论模型更好地描述了控制战略实施的过程, 把时间作为模型优化的一个因子, 这种基于时间序列的过程充分考虑了货币的时间价值, 并能分析这些时间价值对二氧化硫污染控制战略的动态过程影响。本文的模型是更加符合现实的情况, 它对于区域二氧化硫控制的中长期决策优化显得更为有效和准确。

关键词 损害函数法; 环境标准化法; 二氧化硫; 时间序列; 模型

中图分类号 X196 **文献标识码** A **文章编号** 1002 - 2104(2005) 06 - 0067 - 04

随着全球工业化的加速, 环境污染问题愈发突出, 甚至已经严重威胁到了人类的生存。大气污染是其中一个重要的环境污染问题, 而造成大气污染的重要来源之一便是 SO_2 的排放。控制 SO_2 排放已经是一个全球性的问题, 自从 20 世纪 70 年代初, 美国和日本率先实施控制 SO_2 排放战略以来, 许多国家相继制定了严格的 SO_2 排放标准和中长期控制战略, 加速了控制 SO_2 的步伐^[1]。

进入 20 世纪 90 年代以来, 我国的酸雨危害日益加重, 随之国家出台了 SO_2 排放的总量控制控制战略, 意在保护我国的大气环境。但这毕竟只是战略层面的行为, 还必须进入到区域的执行层面行为上, 才能真正达到目标。另一方面, 投入到这些实施过程中的资源是有限的, 因此必须对这一过程进行优化才能达到最大的效益。这就是区域 SO_2 控制优化问题。在传统环境经济学的局部均衡模型中, 有两种常用的优化方法: 损害函数方法和环境标准化方法^[2]。但这两种方法都有一定的局限, 因此本文提出了一种基于时间序列决策的改进优化模型。

1 损害函数法及其优化模型

1.1 模型描述

损害函数法是通过损害函数表示损害活动(如水污染、空气污染等)对自然资源、人为资产或对人类健康所造成的物资损害。损害函数是一种技术关系, 其数据是自然科学家通过调查或实验得到的。如果想进一步得知社会因为此污染所承受的成本, 需将这些物质损害转成货币衡量^[3]。

此方法的基本概念在于, 经济活动变化所导致损害变化的关系, 即形成损害函数。亦即损害函数是表示受损害个体与损害活动影响之间的一种关系, 若将此影响以货币表示, 即成为货币损害函数。很明显它是一种成本效益分析方法, 能综合考虑整个控制决策的收益与成本, 并从全社会的角度进行衡量, 因此它是比较符合实际的理论方法。

令 $A_i(e_i)$ 表示国家或地区 i 的控制排放的减排成本 (e_i 为地区 i 的二氧化硫排放量), $D_j(\cdot)$ 表示国家 i 中区域 j 根据总体硫沉降量 $\sum_{i=1}^n a_{ij}e_i + b_j$ 而计算出的货币损失函数 (a_{ij} 表示从 i 到 j 的大气转移因子, b_j 为背景硫沉降, 包括非人为源产生的沉降, 也包含非可控源的影响)。对于一个区域的硫沉降, 它有一个临界负荷, Nilsson^[4]是这样定义它的: 生态系统的硫沉降临界负荷, 或简称硫沉降临界负荷, 是在不导致对生态系统的结构和功能产生长期有害影响的化学变化时, 生态系统所能承受的最大酸性沉降量。根据 Nilsson 的定义, 则对于 $\sum_{i=1}^N a_{ij}e_i + b_j \leq CL_j$ (j 区域的临界负荷) 有 $D_j = 0$, 也就是 j 当区域的硫沉降小于临界负荷时, 造成的社会损失为零。根据设置成本效益分析的条件, 则相应的社会成本最优则可以用下述模型^[5]表示:

$$\text{Min } c = \sum_{i=1}^N A_i(e_i) + \sum_{j=1}^R D_j \left(\sum_{i=1}^N a_{ij}e_i + b_j \right)$$

这是一个无约束优化问题, 它的最优条件为一阶导数为 0, 即:

$$A'_i(e_i) + \sum_{j=1}^R D'_j a_{ij} = 0 \quad i = 1, \dots, N$$

收稿日期: 2005 - 09 - 16

作者简介: 王青, 博士生, 研究方向为环境经济。

1.2 模型评价

损害函数法的局限性在于:在许多情况下环境效益的货币评价存在许多方面的问题。首先,在进行环境效益评价过程中,无法使用一种科学化的方法定量衡量由空气污染造成的环境损失。因此得出的环境效益货币评价结果并不是完全可靠。其次,很多非市场交易产品,如人的生命和生态系统的价值等,很难精确量化其货币值。尽管我们可以使用观察、经验数据等途径间接归纳出这些价值,但是在实际运作过程中,这些分析方法还是会引起争议。

2 环境标准法及其优化模型

2.1 模型描述

环境标准法是通过排放控制技术的最小成本组合以达到用户自定义的环境空气质量目标。当决策者确定一系列的不同等级的环境标准后,根据控制策略的不断选择,达到实现这些目标的企业内部最小成本解决方案。也就是说,问题变成了寻求最廉价、最有效的途径来实现自然保护的目的或其他目标^[3]。

本文以 RAINS-ASIA 中的优化模型来解释环境标准法。此优化方法通过明确每个控制区域的最大沉降目标的限制来反映整体环境政策目标。环境标准(目标)由以下优化问题的限制条件明确描述:

$$\min_{e_i} \sum_{i=1}^N c_i(e_i^0 - e_i, e_i^0)$$

约束条件为:

$$e_i^{\min}(e_i^0 \leq e_i \leq e_i^0, i = 1, \dots, N$$

$$\sum_{j=1}^N a_{ij}e_j + b_j \leq d_i^*, j = 1, \dots, R$$

其中 $c_i(e_i^0 - e_i, e_i^0)$ 为对于区域 i 的控制成本函数, e_i^0 表示区域 i 的初始排放量, e_i 是最优排放量, 变量 d_j^* 是反映环境目标的沉降量, $e_i^{\min}(e_i^0)$ 是根据地区初始排放量可得的最小排放量, a_{ij}, b_j 同前。

RAINS-ASIA 是如何应用这一方法的呢?事实上,在 RAINS-ASIA 的优化模型中把控制区域划分为能够确定硫沉降目标的 K 个小沉降接收区域,并把 SO_2 污染源分为面源和大型点源 j (点源是通过符合一定条件予以确定的)。决策变量是每个区域的面源排放量 e_i 和每个大型点源的排放量 e_j 。在每个排放水平下的 SO_2 减排成本是根据减排成本函数 $c(e)$ 计算出来的, $c(e)$ 是一个分段线性函数^[6]。排放量的上下限可以根据附加的可选择边界限制条件进行限制,例如一个国家或地区的污染控制部门制定的计划将影响排放量的上限。

面源和点源的排放量范围分别为以下公式:

$$e_i^{\min} \leq e_i \leq e_i^{\max}$$

$$e_j^{\min} \leq e_j \leq e_j^{\max}$$

由此得到区域的排放量范围为:

$$E_i^{\min} \leq e_i + \sum_j e_j \leq E_i^{\max}$$

式中: $E_i^{\min}, E_i^{\max}$ 分别为该区域的最小和最大排放量, J 为该地区大型点源 j 之集。

但模型中的环境目标是用硫沉降描述的,因此上面的约束需要转换成硫沉降的表述。排放量到硫沉降的转化可利用气污染长距离传输的 ATMOS 模型中排放源-受体大气转移矩阵^[7,8]计算。用变量 ds_k 描述二氧化硫沉降不同接收区域 K 的沉降量,它是不允许超过规定的沉降目标 $ds_{k\max}$ 的。这个沉降目标约束与决策变量 e_i 和 e_j 有关,可表示为^[9,10]:

$$ds_k = tss \cdot [\sum_i ts_{ik}e_i + \sum_j ts_{jk}e_j] + ks_k \leq ds_{k\max}^{\max}$$

ts_{ik} 和 ts_{jk} 分别是对于面源和点源的二氧化硫转移系数, ts_{ik} 确定了一个地区的总排放量沉降在区域 k 内的比例, ks_k 是区域 k 中的硫沉降背景,背景沉积量确定了自然排放源(如火山)的排放贡献量和被模型覆盖地理区域外的污染源的贡献量。所有的这些系数都可从大气污染扩散模型得到。 tss 是临界负荷的硫沉降量转化为酸度单位的比例系数。

在沉降约束的条件下,目标函数是将面源和点源的减排成本最小化,即:

$$\min C = \sum_i c_i(e_i) + \sum_j c_j(e_j)$$

固定其它参数,根据排放量的计算过程我们知道 e 实际上是关于控制措施组合的函数,而控制成本可以根据边际成本曲线得到,也可以用成本函数表示。假定面源和点源的控制措施组合变量分别为 u_i, u_j , 则有 $e_i = f(u_i), e_j = f(u_j)$ 。因此成本也就是关于 u 的函数,不妨记 $c_i(e_i) = g_i(u), c_j(e_j) = g_j(u)$, 则控制成本优化模型可表示为:

$$\min C = \sum_i g_i(u_i) + \sum_j g_j(u_j)$$

$$\text{s.t. } tss \cdot [\sum_i ts_{ik}f(u_i) + \sum_j ts_{jk}f(u_j)] + ks_k \leq ds_{k\max}^{\max}$$

2.2 模型评价

仔细分析这个模型,其实存在一个很大的不足。它在进行控制技术决策时是没有对技术采用时间进行决策的,对于一个给定的情景,其对当前和将来的预测都是完全从基点出发,比如一个脱硫工程的实施,模型总是将它放在一个基期开始,这样得到的输出结果建议往往令基期的投资非常巨大。但实际中,在一个时期投入这么多资金,融资必然会出现困难,甚至会影响区域经济的健康发展,导致得不偿失,这样的政策建议可施行度是较差的。这导致它应用于中长期决策优化的结果并不理想,与实际行为有较大的偏差。

3 基于时间序列决策的 SO_2 控制优化模型

3.1 模型假设

一个很明显的现实是,区域在实施总量控制目标的过程中总是分期分步骤制定实施的,这里有诸多的原因需要

考虑,比如地方经济的稳定发展,投入资金的限制等。因此实际上在区域的控制实施中,不仅要优化决策采用什么样的控制措施,同时还要决策这些措施采取的时间。这样才能达到在一个时期内达到目标的控制成本最小化,这便是本文的基于时间序列决策的优化模型所要达到的目标。

按照 RAINS-ASIA 模型的标准和方法,我们同样将污染源划分为面源和点源。对于模型,有几个假设前提条件:

- 时间决策中不考虑面源;
- 每个点源只选用一种措施;
- 不考虑环境收益;
- 点源的规划已知,即新建电厂或机组的建设规划是已知的;

新建电厂或机组的脱硫项目与机组投产日期一致,且必须采用某一控制措施。

对于这几个假设,本文的一些解释是这样的:对于面源,排放源过多,实施到点的控制几乎是不可能的,根据西方发达国家的治理经验,面源的控制实行政策性的引导以改变消费行为方式,使其消费逐步缩小,转化到点源能力的扩展上。因此本文认为面源的控制是根据宏观规划逐步实施,不再进入优化的范围。而每个点源只采用一种控制措施,一方面是简化模型,另一方面从规模效应的角度看也是合理的,因为根据点源的划分,通常一个点源就是一个大的电厂,而一个厂多个机组都采用相同的技术是具有规模优势的。而对于环境收益,实际上在制定总量控制目标的过程中已经考虑到了,这里便无需再考虑进入优化模型。

从投资者的角度看,一个脱硫项目的成本将由三个部分构成,即项目建设投入资金 A、投入资金的机会成本 C、项目建成后的运营费用 B。资金的机会成本表示资金用于该项目而丧失其它获利机会的成本,它可以根据同期的资金利润率水平采用复利公式计算。

假定一个地区有 n 个电厂, m 项可采用的技术,这 n 个电厂中有 k 个为现有的电厂,其余为新建电厂或机组,决策周期长度为 T 年。我们使用采用 0-1 变量 x_{ij} 表示电厂对技术的选择, $x_{ij} = 0$ 表示电厂 i 未采用技术 j , $x_{ij} = 1$ 表示电厂 i 采用技术 j 。需要注意的是 $j = 0$ 这项技术表示不采用任何控制。根据假设条件,技术的选择还应满足:

$$\sum_{j=0}^m x_{ij} = 1$$

对于各项技术,依据历史经验的技术经济分析,可以得到它们相应的各项成本系数、建设周期以及除硫效率等,根据这些成本系数,便可以计算地区电厂的控制成本。为了简化模型,本文假定对一个项目建设的资金总是在开建时间一次性投入。

3.2 模型描述

对于已有电厂,各项成本分别是:

$$\begin{aligned} A_{old} &= \sum_{i=1}^k d_i \sum_j a_j \cdot x_{ij} \\ B_{old} &= \sum_{i=1}^k d_i \sum_j b_j \cdot x_{ij} \\ C_{old} &= \sum_{i=1}^k C_i = \sum_{i=1}^k A_i (1+r)^{T-t_i+e_j \sum_{j=1}^m x_{ij}} \end{aligned}$$

式中: d_i —电厂装机容量; a_j —技术 j 的投资成本系数; b_j —技术 j 的机会成本系数; t_i —企业 i 控制技术投入使用时间 ($0 \leq t_i \leq T$); e_j —技术 j 的建设周期

$$\begin{aligned} A_{new} &= \sum_{i=k+1}^n d_i \sum_j a_j \cdot x_{ij} \\ B_{new} &= \sum_{i=k+1}^n d_i \sum_j b_j \cdot x_{ij} \\ C_{new} &= \sum_{i=k+1}^n C_i = \sum_{i=k+1}^n A_i (1+r)^{T-t_i+p_i} \end{aligned}$$

这里 p_i 是指新建电厂 i 的电厂建设周期。综合以上内容,则地区实施二氧化硫控制的总成本为:

$$\begin{aligned} U &= \sum_{i=1}^k d_i \sum_j a_j \cdot x_{ij} + \sum_{i=1}^k d_i \sum_j b_j \cdot x_{ij} + \sum_{i=1}^k A_i (1+r)^{T-t_i+e_j \sum_{j=1}^m x_{ij}} \\ &+ \sum_{i=k+1}^n d_i \sum_j a_j \cdot x_{ij} + \sum_{i=k+1}^n d_i \sum_j b_j \cdot x_{ij} + \sum_{i=k+1}^n A_i (1+r)^{T-t_i+p_i} \\ &= \sum_{i,j} d_i (a_j + b_j) \cdot x_{ij} + \sum_{i=1}^k A_i (1+r)^{T-t_i+e_j \sum_{j=1}^m x_{ij}} + \sum_{i=k+1}^n A_i (1+r)^{T-t_i+p_i} \end{aligned}$$

我们将其简记为 $U = f(x, t)$, 这便是目标函数,而它是受总量控制条件约束的。由于地区的各时间点控制总量目标是明确的,记为 Q_s (下标 s 表示时间点, $0 \leq s \leq T$), 另一方面,对于面源采用了既定的控制措施,因此点源的各时间点的控制排放总量已知,记为 Q_{is} , 则有:

$$0 \leq \sum_i Q_{is} \leq Q_s$$

这里的 Q_{is} 对于已有和新建电厂以及控制前和控制后的排放量计算是各不相同的,假定技术 j 的除硫效率为 μ_j , 初始排放量为 R 。引入 0-1 变量 y_{is} 表征区分 i 电厂在 s 年是否已实施了控制技术, $y_{is} = 0$ 表示未实施, $y_{is} = 1$ 表示已实施。因为实施时间 t_i 是我们的决策变量,故 y_{is} 是 t_i 的函数:

$$y_{is} = \begin{cases} 0 & s \leq t_i \\ 1 & s > t_i \end{cases}$$

那么对于 Q_{is} 有:

$$Q_{is} = \begin{cases} R_i + (1 - \sum_j \mu_j x_{ij}) R_i \cdot y_{is} & i \leq k \\ (1 - \sum_j \mu_j x_{ij}) R_i \cdot y_{is} & i > k \end{cases}$$

由此,这种基于时间序列决策的优化模型可以表示为:

$$\begin{aligned} \min U &= f(x, t) \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq \sum_i Q_{is} \leq Q_s \\ Q_{is} &= \begin{cases} R_i + (1 - \sum_j \mu_j x_{ij}) R_i \cdot y_{is} & i \leq k \\ (1 - \sum_j \mu_j x_{ij}) R_i \cdot y_{is} & i > k \end{cases} \\ y_{is} &= \begin{cases} 0 & s \leq t_i \\ 1 & s > t_i \end{cases} \end{aligned}$$

$$\sum_{j=0}^m x_{ij} = 1$$

3.3 模型评价

以上本文对目标问题逐步分析,建立了基于时间序列决策的控制优化模型。这一模型的特点在于加上时间决策后,可以充分考虑到投资的均衡分布和时间价值,并能在模型的优化过程中体现出这种时间价值对控制方案的动态过程影响。它能给出更优的在时间序列上的资金分配及技术的投入。从而得到更符合现实的决策方案,并且具有更好的可实施性。同时,在考虑了这种时间序列决策后,得到的优化结果将会更精确,更具体,尤其在中长期决策中,相对于传统方法具有更好的准确性,这是对传统方法不足的完善与改进。

4 结 语

本文在分析比较了传统二氧化硫污染控制优化中的损失函数法和环境标准化法各自的优点与局限的基础上,指出了传统方法无法反映在方案规划决策中资金具有时间价值这样的缺陷。而这种投资的时间价值在实际的控制策略方案规划中是必须考虑的,因为在对未来规划的每个时点上不仅是具有资金约束的,并且在不同的时点投入不同的资金也将影响环境产出评价。文章基于对资金的时间价值分析和二氧化硫控制战略分析的基础上,逐步建立了基于时间序列决策的整数规划优化模型。这一理论模型能更好地描述控制策略实施的决策优化过程,能更好的模拟现实的控制战略规划实施与投资过程,因而更加符合现实的情况。它对于中长期的决策优化更为有效和准确,很好的弥补了传统方法的不足。但由于模型整数规划的函数性状比较复杂,在一般意义下的模型求解是一个有

待进一步研究的问题。

(编辑:刘文政)

参考文献:

- [1] 郝吉明,王书肖,陆永琪. 燃煤二氧化硫污染控制技术手册[M]. 北京:化学工业出版社,2001. [Hao Jiming, Wang Shuxiao, Lu Yongqi. The technology handbook of pollution control of sulfur dioxide in burning coal [M]. Beijing: Chemical industry press,2001.]
- [2] Markus Amann. An Economic Interpretation of the Compensation Mechanism in the RAINS Model [J]. Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis, 2000, 6.
- [3] Baumol, W. J. and W. Oates. The theory of environmental policy [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1988.
- [4] Nilsson, et al. Critical loads for nitrogen and sulfur [J]. Miljørapport, Nordisk Ministerråd/ Nordic Council of Ministers, Copenhagen, Denmark. 1986, (11).
- [5] Amann, Markus, I. Bertok, J. Cofala, et al. Cost-effective control of acidification and ground level ozone [J]. Sixth Interim Report to the European Commission, DG XI, IIASA, 1998.
- [6] Markus Amann, Janusz Cofala, Chris Heyes, et al. The Regional Air Pollution Information and Simulation (RAINS) model [J]. Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis, 2004, 44 ~ 47.
- [7] Arndt R. L., Carmichael G. R., Roorda J. M. Seasonal Source-Receptor Relationships in Asia [J]. Atmospheric Environment, 1998, (31), 1 553 ~ 1 572.
- [8] Arndt R. L., and Carmichael G. R. Long-Range transport and deposition of sulfur in Asia [J]. Water, Air and Soil Pollution, 1995(85), 2 283 ~ 2 288
- [9] Cofala J., Amann M., Klimont Z. Calculating Emission Control Scenarios and their Costs in the RAINS Model: Recent Experience and Future Needs [J]. Pollution Atmosphere, 2000, (10), 37 ~ 48.
- [10] Cofala, J. and Syri, S. Sulfur emissions, abatement technologies, and related costs for Europe in the RAINS model [C]. IIASA, Laxenburg, Austria. 1998, (35).

Study of Regional SO₂ Optimizing Control Model

WANG Qing¹ ZOU Ji¹ WANG Lei²

(1. School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China;

2. Jinan Electric Power Supply Company, Jinan Shandong 250014, China)

Abstract Damage function approach and environmental standards approach are mainly used in regional SO₂ optimizing pollution control. Based on the analysis of the virtues and limits of traditional optimizing approaches, this paper built a serial integer-programming model for optimizing pollution control. This theory model better describes the process of control strategy implementation, and it considers time as an optimal factor. This serial approach considers the time value of money, and analyze the dynamic influence of time value on SO₂ control strategy. The model accords with the realistic world more than existing models, and it is more accurate and efficient for long-term decision of SO₂ control.

Key words damage function approach; environmental standards approach; SO₂; time series; model