

区域大气污染联动治理合作博弈模型

面对日益严峻的区域性大气污染问题，我国近年来连续颁布了《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见》、《重点区域大气污染防治“十二五”规划》、《大气污染防治行动计划》等一系列政策措施，开展大气污染联防联控，但这些规划和政策文件均是在属地管理模式的框架下实施的，导致：①割裂了大气环境的整体性，难以满足区域性大气污染防治的要求；②无法发挥某些省份的去污成本优势，难以达到区域资源最优化配置；③区域治污成本高昂但治污效果不佳，公众感知的环境空气质量却未明显改善甚至越来越糟。本研究从降低人群健康损害目标出发，将减缓人群健康损害纳入区域污染治理目标体系，建立区域大气污染联动治理合作博弈模型，打破属地管理模式的束缚，建立区域大气污染联防联控长效激励机制。并以泛长三角区域的工业二氧化硫治理为例进行实证研究，进而提出对策与建议。

一、研究方法

（一）区域合作最优去除率模型

以暴露-反应关系泊松回归模型的线性展开式来衡量的 i 地区 j 年龄组第 k 种疾病由于污染治理所降低的人群健康损害 (ΔE_i) 为：

$$\Delta E_i = p_{ij} \cdot h_{ijk} \cdot \beta_{ijk} \cdot \left(\rho - \frac{\sigma}{x_i} \right), \forall i \quad (1)$$

其中， p_{ij} 表示 i 地区第 j 年龄组人群的人口数量， h_{ijk} 为 i 地区 j 年龄组内第 k 种疾病死亡的基线值，剂量反应系数 β_{ijk} 表示单位污染

浓度变化引起的 i 地区 j 年龄组 k 种疾病死亡率的变化量, ρ 和 σ 为待估参数。

在曹东等人 (2009) 建立的去污成本计量模型基础上, 以污染物年去除量 (r_i) 占年产生量 (g_i) 的百分比作为去除率 x_i , 建立地区 i 的污染去除成本 (rc_i) 函数, 如 (2) 所示:

$$rc_i = \delta_i \cdot (w_i)^{\varphi_i} \cdot (x_i)^{\mu_i}, \forall i \quad (2)$$

其中, w_i 代表 i 地区某大气污染物载体的年排放量, δ_i 、 φ_i 和 μ_i 为待估参数。

对任意 $i \in \{1, 2, \dots, m\}$, $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, $k \in \{1, 2, \dots, q\}$, 建立区域内各地区最优去除率模型如下:

$$\begin{cases} \max_{x_i} f_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^q p_{ij} \cdot h_{ijk} \cdot \beta_{ijk} \cdot \left(\rho - \frac{\sigma}{x_i}\right) & (3) \\ \min_{x_i} f_2 = \sum_i^m \delta_i \cdot (w_i)^{\varphi_i} \cdot (x_i)^{\mu_i} & (4) \end{cases}$$

$$s. t. \begin{cases} g_i \cdot (1 - x_i) \leq v_i, \forall i & (5) \\ 0 < \underline{a}_i \leq x_i \leq \bar{a}_i < 1, \quad \forall i & (6) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m g_i \cdot x_i = \sum_{i=1}^m (g_i - e_i), \forall i & (7) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \rho - \frac{\sigma}{x_i} \geq \tau_i, \quad \forall i & (8) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \left(\rho - \frac{\sigma}{x_i}\right) \geq \pi, \forall i & (9) \end{cases}$$

(3) 式表示降低区域人群健康损害 (ΔE) 最大化目标, ΔE 等于各地区人群健康损害降低量之和, (4) 式表示区域污染去除成本最小化目标, 各地区去污成本之和作为区域去污成本 (rc)。

(5-9) 式是优化模型的约束条件。不等式 (5) 表示各地区污染物的排放量不得超过本地环境容量 (v_i), 其中, 各地区环境容量为国家当年分配给该地区的污染物限排指标 (e_i) 的 σ_i 倍。由于受技术水平、资金、治理能力等条件限制, 各地区污染去除能力有一定范围。当 i 地区去污设备全部满载工作时, 去除率可达到最大值 \bar{a}_i , 但不可能将污染物全部去除, $\bar{a}_i < 1$ 。另一方面, 该地区去除设施或多或少能去除一部分污染物, 即 x_i 不低于其最小值 \underline{a}_i , $\underline{a}_i > 0$ 。因此, 各地区 x_i 受条件 (6) 约束。不等式 (7) 表示区域污染物的总去除量必须满足国家设定的减排量指标要求。另外, i 地区年均污染浓度的下降水平不得低于国家规定的污染浓度下降指标 (τ_i), 同时, 区域污染浓度下降水平也不得低于国家设定的该区域污染浓度下降指标 (π), 因此决策变量 x_i 受条件 (8) 和 (9) 约束。

(二) 基于 Shapley 法的区域合作收益分配模型

减少的人群健康损害可视为污染治理投入带来的收益, 区域人群健康损害降低收益对应的货币价值 (b) 等于单位人群健康损害降低的货币价值 (u) 与降低的区域总人群健康损害的乘积:

$$b = u \cdot \sum_i^m \Delta E_i \quad (10)$$

区域大气污染治理的综合成本 (tc) 等于区域污染去除成本 (rc) 与 b 之差, 即

$$tc = rc - b = \sum_i^m (rc_i - u \cdot \Delta E_i) \quad (11)$$

区域合作治污所获得的合作收益 (v) 等于属地模式与合作模式

下对应的区域污染综合治理成本 $tc_{\text{属地}}$ 与 $tc_{\text{合作}}$ 与之差, 如(12)式所示, v 包含两方面: 节约的区域污染去除成本和区域人群健康收益。

$$v = tc_{\text{属地}} - tc_{\text{合作}} = (rc_{\text{属地}} - rc_{\text{合作}}) + (b_{\text{合作}} - b_{\text{属地}}) \quad (12)$$

各地区都希望自身获得的收益越大越好, 因此如何科学合理地分配合作收益 v 成为合作治污能否长效开展的关键。运用Shapley值法将合作收益按照参与合作治污的贡献在各地区之间合理分配。

若区域内各地区集合 $I = \{1, 2, \dots, m\}$ 的任一子集 s , 都对应实值函数 $v(s)$, 满足 $v(\emptyset) = 0$, $v(s_i \cup s_j) \geq v(s_i) + v(s_j)$, 其中 $v(s_i \cap s_j) = \emptyset$, 则称 $[I, v]$ 为 m 个地区的合作对策, v 称为对策的特征函数, $v(s)$ 称为地区合作联盟 s 的收益值。Shapley 值由特征函数 v 确定, 记作 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$, 称为区域合作博弈的分配策略, 其中任意地区 i 参与合作时所获得的合作收益 $y_i(v)$ 为

$$y_i(v) = \sum_{s_i \in I} \lambda(|s|) [v(s) - v(s \setminus i)] \quad (13)$$

式中, $\lambda(|s|)$ 是加权因子, $|s|$ 代表联盟 s 的规模。 $v(s \setminus i)$ 表示 i 地区不参与合作时联盟获得的合作收益, 则 $v(s) - v(s \setminus i)$ 表示对于联盟 s , 当地区 i 不参加该联盟时对该联盟的影响, 反映了地区 i 对联盟 s 合作收益的贡献。地区 i 以随机形式参与并形成联盟 s 的概率为 $\frac{(m-|s|)!(|s|-1)!}{m!}$, 即地区 i 在合作收益分配中的加权因子为

$$\lambda(|s|) = \frac{(m-|s|)!(|s|-1)!}{m!} \quad (14)$$

二、实证研究结果

长三角区域经济发达、人口密集, 是我国严重雾霾频发地区之一, 也是我国开展大气污染联防联控重点区域之一。因此, 以泛长三角区

域苏、浙、沪、皖四省市2012年的工业SO₂治理为对象进行实证研究具有代表性。

（一）合作治污效果明显优于属地治理模式

2012年，沪、苏、浙、皖四省市在属地治理模式下的工业SO₂去除率分别为70.73%、69.31%、70.81%和76.62%。合作治污模式下四省市的最优去除率分别是60.94%、68.84%、63.28%和90%，安徽省的污染去除率大幅提升，其它三省市的去除率比属地治理模式略有降低。据此可知，同为完成597.9万吨的区域总去污量，合作模式仅需96.01亿元，比属地治理模式（97.85亿元）节约1.88%，约1.84亿元。合作治理使整个区域减少因SO₂污染造成的过早死亡4054人，相当于获得人群健康收益21.31，比属地治理模式多获得12.08%（437人，健康收益约2.3亿元）。综合去除成本节约与人群健康收益两方面来看，四省市合作收益4.14亿元，相当于属地治理模式下综合治理成本的5.25%。

对比两种治污模式下减缓的人群健康损害情况，发现：①在0-14岁、15-64岁、65岁及以上三个年龄组中，无论是在合作治理还是属地治理下，从污染治理中健康获益最多的人群是65岁以上人群；②在两种治污模式下，各省份心血管疾病过早死亡降低量均比呼吸系统疾病过早死亡降低量大，说明心血管疾病患者比呼吸系统疾病患者从污染治理中获益更大；③各省份合作前后过早死亡降低量的差异各有不同，与污染去除率变化一致。合作治污实现了我国中央政府将长三角区域作为重点区域，通过联防联控最大程度地降低污染造成的人群

健康损害的初衷。

（二）合作收益分配模型激励作用明显

按照其在合作治污过程中的贡献，上海、江苏、浙江、安徽可分别获得合作收益 8026.25、2074.74、12950.91、18310.82 万元。在合作治理模型中，由于安徽省为其他三省市多承担了万吨的污染去除任务，上海、江苏、浙江需分别向安徽支付污染治理资金 25535.5、3138.2、50888.6 万元，以此作为资金补偿。

三、对策建议

与属地治理模型相比，合作博弈模型充分考虑了各省市治污压力、人群健康损害和污染去除成本等方面的差异，合作收益分配更合理，各省分配的合作收益之和与最优合作方案下联盟合作收益相等，达到各省共赢，可激励四省建立长期合作的治污联盟。另外，基于政策的合作博弈模型能够激励那些污染去除能力过剩地区充分发挥其去污潜能，帮助区域内其它地区完成去除任务，从而增加自身获得的资金补偿，同时也能鼓励其它省市提高自身污染去除技术水平。从长期来看，这将显著提高区域大气污染防治的动态效率，从而形成“合作→高效→合作”的良性循环。为使合作收益分配模型在大气污染联动治理实践中的推广，提出以下建议：

首先，合作博弈模型相对于属地治理模型优越性大小，取决于区域内各地区污染去除成本、人口分布、年龄结构等因素的差异性大小。差异性越大，合作博弈模型的优势越明显。因此，合作博弈模型更适合的实施区域应具备的特征是：区域内各地区在人口规模、年龄结构、污染去除成本等方面存在显著差异。

其次，本研究提出的合作博弈模型把降低人群健康损害目标纳入区域大气污染治理目标体系，有助于我国大气污染治理由总量控制向质量转变升级，同时也为各年龄组人群健康损害防护措施的制定提供了科学依据。例如，在雾霾易爆发的冬春季节，应加强对老年人、心血管病人的防护，降低这类人群在污染环境的暴露，可有效降低污染造成的健康损害。因此，我国大气污染联动治理可采用本研究提出的合作博弈模型，突破当前属地治理模式的束缚，鼓励区域内各地区间建立长效合作关系，并实现总量减排向质量改善的转型升级。

撰稿人：浙江财经大学中国政府管制研究院 谢玉晶 博士

原文：《A cooperative reduction model for regional air pollution control in China that considers adverse health effects and pollutant reduction costs》，

作者：谢玉晶，刊于《Science of the Total Environment》2016 年