

空间关联视域下跨区域治污资源配置研究

徐 飞*

摘要:本文基于大气污染空间关联特征,结合政府污染治理联防联控原则,构建中央政府总量控制配置优化模型和统一价格拍卖配置决策模型,以实现治污资源配置帕累托最优和环境治理总成本降低。并以北京市和天津市空气质量指数AQI为例,应用Copula联合分布函数对京津城市间大气污染排放联合分布作仿真预测,进行中央政府总量控制和统一价格拍卖治污资源优化配置仿真优化。结果表明:降低资源配置错配率更有利于实现资源配置的帕累托最优;基于正态Copula联合分布预测数据来优化配置结果,更接近北京市和天津市实际污染排放优化配置结果。本文研究表明地区间污染排放空间关联应成为跨区域治污资源配置决策的依据之一。

关键词:治污资源配置;帕累托改进;Copula函数;空气质量指数

一、引言

经济发展与环境保护关系人类社会可持续发展,但经济增长背后的结构不合理、技术落后等,也带来一些潜在问题,环境污染与经济增长的矛盾日益突出(赵连阁等,2014)。当前,我国单位GDP能源消耗是发达国家的8~10倍,环境污染是发达国家的30倍,环境污染造成的经济损失占到国民生产总值的8%~15%(黄菁、陈霜,2011)。作为公共利益代表者,政府承担污染治理主要责任,有必要增加污染治理投入,以降低经济增长带来的环境负面效应。

在环境污染问题中,大气污染具有明显空间关联性,这要求地区间大气污染治理实行联防联控。例如,徐祥德等(2005)研究城市群落大气污染源影响的空间结构及尺度特征,发现由于

*徐飞,武汉大学经济与管理学院,邮政编码:430072,安徽师范大学经济管理学院,邮政编码:230000,电子邮箱:xufei168@ahnu.edu.cn。

本文系安徽省哲学社会科学青年项目“制度距离、进入壁垒与安徽省区域产业融合研究”(AHSKQ2016D49)、安徽省社会科学普及规划项目“基于大数据的社科普及表达模型及其理论基础”(Y2016005)和安徽省教育厅高校人文社会科学项目“CFO履职环境、离职事件与会计信息质量影响研究”(SK2017A0277)的阶段性成果。感谢匿名审稿人提出的宝贵意见。文责自负。

大气动力、热力特征,北京大气污染气溶胶颗粒物的排放源可远距离追溯到河北、山东及天津等地。王金南等(2012)指出区域性、复合型大气污染是中国目前以及今后一段时期内所面临的主要大气污染问题,亟需建立区域大气污染联防联控机制。白永亮等(2016)以工业SO₂污染为例分析我国大气污染的空间关联,发现我国工业SO₂污染总体存在不均衡的空间集聚特征,呈现北重南轻的空间聚类趋势。为解决跨区域性质的环境污染问题,2010年国务院办公厅发布的《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》明确京津冀、长三角和珠三角地区是我国大气污染联防联控的重点;2014年修订通过的《环保法》,要求建立跨行政区域的重点区域、流域环境污染和生态破坏联合防治协调机制。

政府作为污染治理主体,不仅要关注治污技术更新,还需要考虑治污资源在地区间的优化配置。一方面要控制治污成本,另一方面要提高治污资源效率。因此,本文以北京市和天津市为例,基于Copula相依结构预测京津地区大气污染联合排放情况,进行政府控制总量配置和统一价格拍卖配置仿真优化,以提升污染治理的效率与效果。

二、资源配置模型设计

政府治污资源配置过程中参与者包括中央政府和地方政府,考虑要素包括地区污染排放情况、治污投入力度和治污资源分配方式。资源配置基本目标是实现治污资源有效利用,降低环境成本。由于治污资源形式众多,包括资金、人力、设备、信息技术等,同时资源配置结构不同也直接影响治污效果与效率。为简化分析,本文参照陈文颖和侯盾(1999)、崔亚飞和刘小川(2009)、肖欣荣和廖朴(2014),基于政府综合污染治理投入进行仿真优化。

(一)基本模型

政府计划对 N 个地区进行大气污染治理资源配置,投入总力度为当日最大治理空气污染物 Q 单位,治污治理投资具有不可逆性。各地区治污资源配置量必须满足:

$$0 \leq q_i \leq Q$$

其中, $i=(1, 2, \dots, N)$, q_i 是地区 i 治理资源配置量,应小于等于中央政府总投入量 Q 。配置后 i 地区日最大空气污染治理量为 q_i 单位。同时各地区治污资源配置总和应等于中央政府治污资源最优投资总量 Q ,即

$$\sum_{i=1}^N q_i = Q$$

治污资源配置后的效益 U_i 表现为实际治理空气污染物,效益大小受日最大治污量 q_i 和日实际空气污染物排放量 $g_{i,t}$ 联合影响。配置后空气污染治理效益函数为:

$$U_{i,T} = \sum_{t=1}^T \min(q_i, g_{i,t})$$

其中, $g_{i,t}$ 为 i 地区在治污资源配置后第 t 日的实际污染排放量, q_i 为日最大治污量。 $\min(q_i, g_{i,t})$ 为地区 i 配置 q_i 单位污染治理量后在 t 日发挥的最大效用: 如果 q_i 大于 $g_{i,t}$, 则第 t 日治污资源实际发挥 $g_{i,t}$ 单位治理效果, 存在 $(q_i - g_{i,t})$ 单位治理能力浪费; 如果 $g_{i,t}$ 大于 q_i , 则第 t 日实际污染量超过最大治污力度, 不存在治污资源浪费, 但存在 $(g_{i,t} - q_i)$ 单位治理能力缺口。中央政府基本治污资源优化模型可设置如下:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i=1}^N U_{i,T} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} 0 \leq q_i \leq Q \\ \sum_{i=1}^N q_i = Q \\ U_{i,T} = \sum_{t=1}^T \min(q_i, g_{i,t}) \end{cases} \end{aligned}$$

其中, $U_{i,T}$ 为 T 期内地区治污资源效用之和, 受政府治污资源配置结构、地区实际污染排放量影响。

(二) 中央政府总量控制配置

中央政府作为治污资源配置主体, 全权负责治污能力配置, 并且配置后具有不可逆性, 承担资源配置后果。因此中央政府配置的根本目的除提高污染治理效果, 还应当考虑降低资源错配率, 实现资源配置帕累托最优。

表1以不同情形治污资源配置为例, 对 i 地区和 j 地区进行治污资源配置比较。假设 t 日 i 地区实际污染排放量为 $g_{i,t}$, j 地区实际污染排放量为 $g_{j,t}$ 。中央政府配置治污资源总量 Q 为日最大处理 150 单位, 其中 i 地区配置量 q_i 为 80 单位, j 地区配置量 q_j 为 70 单位, U 为治污资源实际发挥效用。

表1 模拟治污资源配置效用比较表

| | 第1日 | 第2日 | 第3日 | 第4日 |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|
| 治污资源总量 Q | 150 | 150 | 150 | 150 |
| 地区 i 配置量 q_i | 80 | 80 | 80 | 80 |
| 地区 i 实际排放 $g_{i,t}$ | 90 | 90 | 50 | 50 |
| 地区 i 配置效用 $U_{i,t}$ | 80 | 80 | 50 | 50 |
| 地区 j 配置量 q_j | 70 | 70 | 70 | 70 |
| 地区 j 实际排放 $g_{j,t}$ | 80 | 60 | 90 | 40 |
| 地区 j 配置效用 $U_{j,t}$ | 70 | 60 | 70 | 40 |
| 总配置效用 U | 150 | 140 | 120 | 90 |
| 资源治污能力浪费 | 0 | 10 | 30 | 60 |
| 治污资源错配量 | 0 | 10 | 20 | 0 |

其中, 第1天地区 i 实际污染排放量为 90, 地区 j 实际排放量为 80, 均超过两地治污资源配置量, 两地治污资源效用得到全部发挥, 不存在帕累托改进。第2天地区 i 实际污染排放量为 90, 地区 j

实际排放量为 60, i 地区存在治污能力缺口 10 单位, j 地区治污能力剩余 10 单位, 表明存在帕累托最优改进。因此, 当两地资源配置为以下情形时, 表明不存在资源错配和帕累托改进, 即

$$\begin{cases} 0 \leq q_i - g_{i,t}; & 0 \leq q_j - g_{j,t} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} 0 \geq q_i - g_{i,t}; & 0 \geq q_j - g_{j,t} \end{cases} \quad (2)$$

情况(1)为各地治污能力均大于实际污染排放量, 表明各地区均不存在治污能力缺口, 不存在帕累托改进。但此时存在着严重治污资源浪费, 造成这一结果的原因可理解为中央政府治污资源配置总量超标。情况(2)为各地治污能力均小于实际污染排放量, 表明各地区均存在治污能力缺口, 不存在治污能力剩余, 因此也不存在帕累托改进。造成这一结果的原因可理解为两地实际污染量超出治污能力。当两地资源配置为以下两种情形时, 表明存在资源错配和帕累托改进, 即

$$\begin{cases} 0 < q_i - g_{i,t}; & 0 > q_j - g_{j,t} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} 0 > q_i - g_{i,t}; & 0 < q_j - g_{j,t} \end{cases} \quad (4)$$

情况(3)和情况(4)表明其中一方治污能力存在剩余, 而另一方存在治污能力缺口。在此情形下存在资源错配和帕累托改进, 即在不损害治污资源剩余地区效用情况下, 将其剩余治污资源用于存在治污资源缺口地区, 从而提高整体治污效益。

由于治污资源配置具有明显不可逆性, 难以实现跨地区实时调整。中央政府有必要在治污资源配置一开始考虑这种资源错配率, 降低预期资源错配率更符合政府优化目标。因此, 中央政府总量控制配置优化模型调整为:

$$\min \sum_{t=1}^T \frac{F_t}{TQ}$$

$$s.t. \begin{cases} 0 \leq q_i \leq Q \\ \sum_{i=1}^N q_i = Q \\ F_t = \min \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{(q_i - g_{i,t}) + |q_i - g_{i,t}|}{2}, \sum_{i=1}^N \frac{|q_i - g_{i,t}| - (q_i - g_{i,t})}{2} \right\} \end{cases}$$

其中, $\sum_{i=1}^N \frac{(q_i - g_{i,t}) + |q_i - g_{i,t}|}{2}$ 为第 t 日 N 个地区中存在治污能力剩余总额, $\sum_{i=1}^N \frac{|q_i - g_{i,t}| - (q_i - g_{i,t})}{2}$ 为第 t 日 N 个地区中存在治污能力缺口总额, 二者较小者即为可进行帕累托优化数量, 即第 t 日治污资源错配量 F_t 。 $\sum_{t=1}^T \frac{F_t}{TQ}$ 为治污资源配置后 T 期内日均资源错配率。

(三) 统一价格拍卖配置

中央政府总量控制分配能够从总体分配出发降低治污资源错配, 但忽视了治污资源成本, 不利于治污资源综合利用效率提升, 具体表现为难以确定总量合理的投入决策和缺乏对污染

超标的管制。

为此,本文借鉴饶从军和赵勇(2011)构建中央政府统一价格拍卖模型,将中央政府与地方政府视为治污资源提供方和购买方,由买方支付代价竞得治污资源,并承担污染超排的处罚。中央政府统一拍卖模型将治污成本内部化,由地方政府及其代理人支付治污成本,并承担投入不足所导致的处罚成本。因此,地方政府必须同时考虑治污成本、治污需求才能实现综合成本最低,进一步提高治污资源利用效率、降低社会环境总成本。

假设存在地方政府代理人A,由A收集各地污染排放情况并负责向中央政府按照统一价格 c_q 申购 Q' 单位治污资源。接着由A方进行地方政府间统一分配,并且承担污染排放超标处罚。其中污染排放超标为日空气污染排放量超出治污资源配置后的最大治理数量。代理人A采购总成本为:

$$C_q = \sum_{t=1}^T c_q * Q'$$

其中, C_q 为A向中央政府支付的 Q' 单位治污资源总成本; c_q 为单位治污资源日使用成本。污染排放超标处罚成本计为:

$$C_g = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N c_g * \max\{(g_{i,t} - q_i), 0\}$$

其中, C_g 为总污染超排处罚成本,仅当实际排污量 $g_{i,t}$ 超过日最大治污量 q_i 时才进行处罚,否则为0,即 $\max\{(g_{i,t} - q_i), 0\}$ 。 c_g 为单位污染超排处罚成本。代理人A进行治污资源投标决策时,要综合考虑采购成本、污染处罚成本,以实现预期总成本最低。治污资源配置优化模型调整为:

$$\begin{aligned} \min C &= (C_q + C_g)/T \\ \text{s.t.} &\begin{cases} C_q = \sum_{t=1}^T c_q * Q' \\ \sum_{i=1}^N q_i = Q' \\ Q' = Q * k', 0 \leq k' \leq 1 \\ 0 \leq q_i \leq Q \end{cases} \end{aligned}$$

其中, C 为 T 期内日均环境治理总成本,包括 T 期内 Q' 单位治污资源采购成本 C_q 和 T 期内污染排放超标处罚成本 C_g 。中央政府设定治污资源投入总量为 Q 单位,由地方政府统一确定最优采购率 k' ,以实现日均环境治理总成本 C 最低。

三、空气污染排放相依性刻画

治污资源配置是对未来污染事件的提前应对,具有不可逆性。表现在治污资源投入金额

大、需投入固定场所和设施,投资建设后不能进行撤销、更换,或者撤销、更换成本过高。比如污水处理厂建设、大型污染治理设施等。因此,投资建设前要加大理论验证,优化投资结构,降低未来资源错配。影响污染治理资源配置效果的重要因素是投资建设后,实际污染排放情况。一类结果是投资建设的污染治理能力超过未来实际排放情况;一类结果是投资建设的污染治理能力低于未来实际排放情况。前者虽然有效降低污染排放,但可能存在投资浪费、效率低下问题;后者虽然投资建设利用率高,但存在污染治理不足、污染排放超标的问题。

因此在进行污染治理资源配置前,势必要对未来污染排放情况进行估计,从而确定最优污染资源配置。然而,地区间空气污染排放并非完全独立事件,由于空气流动性、污染物扩散等,地区间空气污染情况可能存在关联性。李峰平等(2008)研究指出配置要素之间的关联程度直接影响着资源配置结果,对这些指标间的相关性分析是优化模型求解的前提之一。因此,空气污染排放相依性同样是污染资源配置优化的前提。

(一)相关性理论及模型

随机变量间相关性度量方法有很多,如 Pearson 相关系数、Kendall 秩相关系数、Spearman 秩相关系数。其中 Pearson 相关系数是比较常用的随机变量相关性指标,其计量公式如下:

$$\text{Pearson}(A, B) = \frac{\text{cov}(A, B)}{\sigma(A)\sigma(B)}$$

其中, $\text{cov}(A, B)$ 为随机变量 A 和 B 协方差矩阵, $\sigma(A)$ 、 $\sigma(B)$ 为随机变量 A 、 B 的标准差。但 Pearson 相关系数仅能反映随机变量 A 和 B 间的线性相关性,其绝对值越接近于 1,表明变量间线性相关性越强,其绝对值越接近于 0,表明变量间线性相关性比较弱。然而,现实中变量间大多并非线性相关关系,如 U 型关系、S 型关系等;或者并非在全局存在某一固定线性关系。同时, Pearson 相关性基于变量符合正态性假设下,进行线性相关性预测,但对于变量属非正态分布情况下, Pearson 相关系数不能较好地用来描述变量间的相关性(王俊等, 2013)。

秩相关系数通过变量间秩的分布确定单调关系,其中 Kendall 秩相关系数计量公式为:

$$\text{Kendall}(A, B) = P[(a_1 - a_2)(b_1 - b_2) > 0] - P[(a_1 - a_2)(b_1 - b_2) < 0]$$

其中, (a_i, b_i) 为从总体 (A, B) 随机抽取的样本。如果 $P[(a_1 - a_2)(b_1 - b_2) > 0]$, 表示 (a_1, b_1) 和 (a_2, b_2) 和谐的(同增或同减)概率;如果 $P[(a_1 - a_2)(b_1 - b_2) < 0]$, 表示 (a_1, b_1) 和 (a_2, b_2) 不和谐的概率。

蔡菲等(2013)指出采用 Pearson 线性相关系数作为相关性度量指标,局限于随机变量线性相关和独立的情形,对于非线性关系则无能为力,然而 Copula 理论为随机变量间相依结构建模提供了新途径。

Copula 理论是由 Sklar(1959)首次提出, Sklar 认为可将一个 N 维联合分布函数分解为 N 个边缘分布函数和一个 Copula 函数,这个 Copula 函数描述了变量间的相关性。1999 年 Nelsen 对

Copula 函数进行了严格定义,即 Copula 函数是把随机向量 X_1, \dots, X_N 的联合分布函数 $F(x_1, x_2, \dots, x_N)$ 与各自的边缘分布函数 $F_{X_1}(x_1), F_{X_2}(x_2), \dots, F_{X_N}(x_N)$ 相连接的连接函数,即 $C(u_1, u_2, \dots, u_N)$ 。常用 Copula 函数包括正态 Copula、t-Copula、Gumbel-Copula 和 Clayton-Copula 等。

(二) 京津空气污染排放相依性检验

本文以北京市和天津市 2014 年度日空气质量指数 AQI 作为检验样本,数据来源于国家环保部数据中心。首先对北京市和天津市空气污染排放作正态分布检验,表 2 检验结果显示,北京市和天津市空气污染排放偏度大于 0、峰度大于 3,具有明显的尖峰厚尾特征。然而正态分布为薄尾分布,峰度为 3。因此,北京市和天津市空气污染排放不服从严格正态分布。J-B 检验、K-S 检验进一步在 1% 水平上拒绝北京市和天津市服从正态分布假设,而是服从某种尖峰厚尾分布。

表 2 2014 年京津地区空气污染日排放正态分布检验

| | 偏度 | 峰度 | J-B 检验 | K-S 检验 |
|----|--------|--------|-----------------------|--------------------------|
| 北京 | 1.4431 | 5.3324 | 1.00×10^{-3} | 1.0366×10^{-10} |
| 天津 | 1.6026 | 6.1798 | 1.00×10^{-3} | 3.0606×10^{-12} |

由于这类尖峰厚尾分布复杂、类型众多,常见分布难以进行准确刻画。当总体分布存在不确定时,可利用 CDF 经验函数和 Ksdensity 核密度分布函数估计其概率分布。其中, Ksdensity 核密度函数估计概率分布与北京市、天津市空气污染排放 CDF 经验分布函数相差较小,而理论正态分布函数与 CDF 经验分布函数差异明显。为使用 Copula 函数描述北京市、天津市空气污染排放联合分布,需要对 Copula 函数参数进行估计。其中 Normal-Copula、t-Copula 函数参数 ρ 估计式为:

$$\rho = \sin(\pi/2\tau)$$

其中, τ 为随机变量 Kendall τ 秩相关系数,t-Copula 自由度 ν 参数采用极大似然法估计。阿基米德 Copula 函数族的 Gumbel-Copula 和 Clayton-Copula 参数 α 计量公式分别为:

$$\alpha_{gum} = \frac{2\tau}{1-\tau}$$

$$\alpha_{clay} = \frac{1}{1-\tau}$$

图 1 为北京市和天津市空气污染排放的 Normal-Copula、t-Copula、Gumabel-Copula、Clayton-Copula 估计的函数密度表面图。从图可以看出北京市和天津市空气污染排放存在一定相依关系。为评价 Normal-Copula、t-Copula、Gumabel-Copula、Clayton-Copula 对于估计北京市和天津市空气污染排放相依性的差异,进一步估计四类 Copula 分布的 Kendall τ 秩相关系数,以及测算 Copula 分布与经验 Copula 的平方欧式距离。

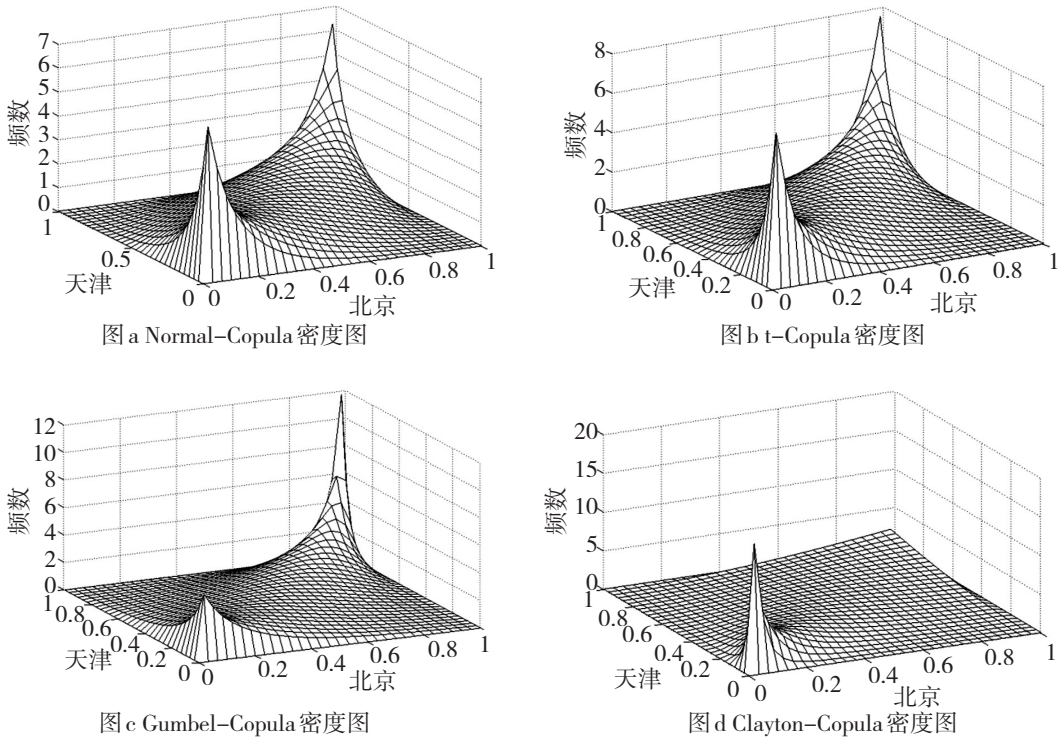


图1 四类 Copula 估计的概率密度表面图

表3显示 Normal-Copula 的 Kendall τ 为 0.5408, 与北京市和天津市 2014 年度空气污染排放分布的 Kendall τ 值差异最小, 并且 Normal-Copula 分布与经验 Copula 平方欧式距离最小。因此, 本文选取正态 Normal-Copula 作为北京市和天津市空气污染排放联合分布估计函数。

表3 2014年京津地区空气污染日排放 Copula 参数估计

| | Norm-Copula | t-Copula | Gumbel-Copula | Clayton-Copula |
|-------------------|-------------|----------|---------------|----------------|
| ρ 或 α | 0.7510 | 0.7815 | 2.0934 | 2.0665 |
| Kendall τ | 0.5408 | 0.5711 | 0.5223 | 0.5082 |
| 欧式距离 | 0.0174 | 0.0211 | 0.0852 | 0.2165 |

四、实例分析

本文选取北京市和天津市作为研究样本, 中央政府计划对北京市和天津市进行治污资源配置。北京市和天津市日空气质量指数 AQI 来源于国家环保部数据中心。以 2014 年度北京市和天津市日空气污染排放数据预测 2015 年排放数据并以此作为检验数据。

(一) 中央政府总量控制配置仿真

假设中央政府要向北京市和天津市两地投建日最大治污总量 Q 单位治污资源, 由中央政府负责统一分配, 投资建设后不可变动。北京地区配置比例记为 $p_{北京}$ 、天津地区配置比例记为 $p_{天津}$ 。中央政府依据 2014 年北京市和天津市空气污染排放历史数据对 2015 年北京市和天津市空气污

染排放进行预测,并依据预测数据进行仿真优化。中央政府优化目标为降低预期资源错配率。

表4为基于Normal-Copula预测数据中央政府治污资源优化配置结果,以及基于2015年度北京市和天津市实际污染排放数据的优化配置结果。其中,中央政府治污资源配置总量 Q 为200单位时,基于Normal-Copula预测数据优化结果为:北京市配置比例 $p_{北京}$ 为50.96%,天津市配置比例 $p_{天津}$ 为49.04%,总错配率为0.91%。基于2015年实际数据优化结果为:北京市配置比例 $p_{北京}$ 为52.47%,天津市配置比例 $p_{天津}$ 为47.53%,总错配率为1.40%。

中央政府治污资源配置总量 Q 为300单位时,基于Normal-Copula预测数据优化结果为:北京市配置比例 $p_{北京}$ 为54.97%,天津市配置比例 $p_{天津}$ 为45.03%,总错配率为0.99%。基于2015年实际数据优化结果为:北京市配置比例 $p_{北京}$ 为54.61%,天津市配置比例 $p_{天津}$ 为45.39%,总错配率为0.88%。

中央政府治污资源配置总量 Q 为400单位时,基于Normal-Copula预测数据优化结果为:北京市配置比例 $p_{北京}$ 为56.40%,天津市配置比例 $p_{天津}$ 为43.60%,总错配率为0.79%。基于2015年实际数据优化结果为:北京市配置比例 $p_{北京}$ 为53.52%,天津市配置比例 $p_{天津}$ 为46.48%,总错配率为0.44%。

表4 基于Copula函数政府总量控制优化配置

| Q | 基于Normal-Copula | | | 基于2015年实际排放数据 | | |
|-----|-------------------------------|----------|----------|-------------------------------|----------|----------|
| | $\sum_{t=1}^T \frac{F_t}{TQ}$ | $p_{北京}$ | $p_{天津}$ | $\sum_{t=1}^T \frac{F_t}{TQ}$ | $p_{北京}$ | $p_{天津}$ |
| 200 | 0.91% | 50.96% | 49.04% | 1.40% | 52.47% | 47.53% |
| 300 | 0.99% | 54.97% | 45.03% | 0.88% | 54.61% | 45.39% |
| 400 | 0.79% | 56.40% | 43.60% | 0.44% | 53.52% | 46.48% |

(二)统一价格拍卖配置仿真

统一价格拍卖配置下,中央政府需确定最大治污资源配置量 Q 、单位治污资源采购成本 c_q 和单位污染排放超标处罚成本 c_g 。由地方政府自行确定最优采购率 k' 和分配比例 p 。案例假设中央政府最大治污资源配置总量 Q 为500,单位污染排放超标处罚成本 c_g 为12,单位治污资源采购成本 c_q 分0、5、10三组情形。

表5为基于Normal-Copula预测数据中央政府治污资源优化配置结果,以及基于2015年度北京市和天津市实际污染排放数据的优化配置结果。单位治污资源采购成本 c_q 为0,即由中央政府无偿提供治污资源时,基于Normal-Copula预测数据优化结果为:北京市配置比例 $p_{北京}$ 为54.21%,天津市配置比例 $p_{天津}$ 为45.79%,日均环境治理总成本 C 为40.53,最优采购率 k' 为99.43%。基于2015年实际数据优化结果为:北京市配置比例 $p_{北京}$ 为52.01%,天津市配置比例 $p_{天津}$ 为47.99%,日均环境治理总成本 C 为37.77,最优采购率 k' 为99.57%。

单位治污资源采购成本 c_q 为 5 时,基于 Normal-Copula 预测数据优化结果为:北京市配置比例 $p_{北京}$ 为 53.26%,天津市配置比例 $p_{天津}$ 为 46.74%,日均环境治理总成本 C 为 1683.61,最优采购率 k' 为 47.81%。基于 2015 年实际数据优化结果为:北京市配置比例 $p_{北京}$ 为 56.56%,天津市配置比例 $p_{天津}$ 为 43.44%,日均环境治理总成本 C 为 1678.44,最优采购率 k' 为 47.76%。

单位治污资源采购成本 c_q 为 10 时,基于 Normal-Copula 预测数据优化结果为:北京市配置比例 $p_{北京}$ 为 45.67%,天津市配置比例 $p_{天津}$ 为 54.33%,日均环境治理总成本 C 为 2614.77,最优采购率 k' 为 23.19%。基于 2015 年实际数据优化结果为:北京市配置比例 $p_{北京}$ 为 47.47%,天津市配置比例 $p_{天津}$ 为 52.53%,日均环境治理总成本 C 为 2525.81,最优采购率 k' 为 24.41%。

表 5 基于 Normal-Copula 函数统一价格拍卖优化配置

| (Q, c_q, c_g) | 基于 Normal-Copula | | | | 基于 2015 年实际排放数据 | | | |
|-----------------|------------------|---------|----------|----------|-----------------|---------|----------|----------|
| | k' | C | $p_{北京}$ | $p_{天津}$ | k' | C | $p_{北京}$ | $p_{天津}$ |
| (500,0,12) | 99.43% | 40.53 | 54.21% | 45.79% | 99.57% | 37.77 | 52.01% | 47.99% |
| (500,5,12) | 47.81% | 1683.61 | 53.26% | 46.74% | 47.76% | 1678.44 | 56.56% | 43.44% |
| (500,10,12) | 23.19% | 2614.77 | 45.67% | 54.33% | 24.41% | 2525.81 | 47.47% | 52.53% |

五、结论与局限性

基于降低错配率考量的中央政府治污资源配置更有利于实现资源配置的帕累托最优,统一价格拍卖配置能同时考虑治污总投入成本和污染排放超标成本,实现环境治理总成本最低。本文对北京市和天津市 2014 年度空气污染排放进行分布检验,研究表明地区污染排放不符合正态分布假定,并且存在尾部相关性。常用的线性相关性检验难以准确刻画地区间空气污染排放相依性,而 Copula 联合分布更能刻画地区间空气污染排放相依性,为进行治污资源配置决策提供依据。通过对北京市和天津市 2015 年度治污资源配置实例分析,表明 $\rho = 0.7510$ 的正态 Normal-Copula 联合分布预测数据优化配置结果,更接近 2015 年度北京市和天津市实际污染排放优化配置结果。验证了考虑相依结构的空气污染资源优化配置的有效性,可以为政府进行治污资源配置决策提供基础依据。

本文得到的启示有:(1)地区间污染物排放存在空间关联,特别是大气污染排放,在开展全国性治污资源配置工作中应当重视该空间关联对于配置决策的影响;(2)中央政府总量控制配置关键在于既定的治污投入水平下降低治污资源错配率,但其忽视了治污资源内在成本以及最优投入总量确定;(3)中央政府实行统一价格拍卖,将治污资源成本内部化,由地方政府代理人综合考虑治污资源成本与污染惩罚成本,从而实现治污成本、治污效果综合最优,但是如何确定有效的、独立的地方政府代理人成为政策实施的关键;(4)基于 Copula 模型能够更好刻画地区间污染排放非对称性关联关系,有助于中央政府跨地区治污资源配置优化。

本文存在的局限有:治污资源内容丰富,并且不同地区资源配置结构也会影响治污效果与效率,本文从政府综合性污染治理投入考虑跨地区治污资源配置优化,忽视了地区间资源使用效率、污染特征差异等对治污资源需求的影响。未来研究可通过引入地区污染治理效率、污染物结构、建设成本等因素,进一步细化我国地区间治污资源配置。

参考文献:

- [1] 白永亮,郭珊,孙涵. 大气污染的空间关联与区域间防控协作——基于全国288个地市工业SO₂污染数据的空间统计分析[J]. 中国地质大学学报(社会科学版),2016,16(3):63-72.
- [2] 蔡菲,严正,赵静波,冯冬涵,郭军,胡殿刚. 基于Copula理论的风电场间风速及输出功率相依结构建模[J]. 电力系统自动化,2013,(17):9-16.
- [3] 陈文颖,侯盾. 基于多人合作对策思想的总量控制优化治理投资费用分摊方[J]. 环境科学学报,1999,19(1):57-62.
- [4] 崔亚飞,刘小川. 中国地方政府间环境污染治理策略的博弈分析——基于政府社会福利目标的视角[J]. 理论与改革,2009,(6):62-65.
- [5] 黄菁,陈霜. 环境污染治理与经济增长:模型与中国的经验研究[J]. 南开经济研究,2011,(1):142-152.
- [6] 李峰平,薛伟,周宏明,陈亚绒. 基于顾客满意的企业资源配置决策优化模型[J]. 计算机集成制造系统,2008,(2):275-281.
- [7] 饶从军,赵勇. 基于统一价格拍卖的初始排污权分配方法[J]. 数学的实践与认识,2011,(2):48-55.
- [8] 王金南,宁森,孙亚梅. 区域大气污染联防联控的理论与方法分析[J]. 环境与可持续发展,2012,37(5):5-10.
- [9] 王俊,蔡兴国,季峰. 基于Copula理论的相关随机变量模拟方法[J]. 中国电机工程学报,2013,(8):75-82.
- [10] 肖欣荣,廖朴. 政府最优污染治理投入研究[J]. 世界经济,2014,(1):106-119.
- [11] 徐祥德,周秀骥,施晓晖. 城市群落大气污染源影响的空间结构及尺度特征[J]. 中国科学(D辑:地球科学),2005,35(S1):1-19.
- [12] 赵连阁,钟搏,王学渊. 工业污染治理投资的地区就业效应研究[J]. 中国工业经济,2014,(5):70-82.
- [13] Nelsen,R.B. An Introduction to Copulas[M]. NewYork: Springer, 1999.
- [14] Sklar,A. Fonctions de Répartition Á N Dimensions Et Leurs Marges[J]. Publication de l Institut de Statistique de L Universit É de Paris, 1959,(8): 229-231.

The Allocation of Cross Regional Pollution Control Resources under the Perspective of Spatial Correlation

Xu Fei^{a,b}

(a: Economics and Management School of Wuhan University; b: Economics and Management School of

Anhui Normal University)

Abstract: Based on the characteristics of air pollution control resource allocation, this paper constructed the model of the central government allocation and the uniform price auction allocation model, which set the goal of reducing the

(下转第122页)

Crisis and Countermeasure Analysis on Climate Change Adaptation of Urban Lifeline System

Fu Lin^a, Yang Xiu^a and Feng Xiaoya^b

(a: Department of Policy and Regulation, National Center for Climate Change Strategy and International Cooperation;

b: Beijing University of Civil Engineering and Architecture)

Abstract: Climate change is a global wide challenge and had influenced human survival and development profoundly. Urban area is the center and the major gathering place of economy and production activities in human society. By the year 2020, urbanization rate of permanent population in China will reach approximately 60%, and above 70% of Chinese living in the urban area by the year 2030. The safety of the urban lifeline system matters the normal operation of the various functions in urban area directly. Therefore, it's crucial to adapt positively and improve the ability of urban lifeline system to extreme climate for urban area, and will be of great importance in the sustainable and healthy of China's economy and development. Commonly seen extreme climate and weather events are classified by moisture, temperature, air flow in this article. The potential climate change adaption crisis of various extreme climate/weather events towards water supply and dewatering system, energy system, transportation system and communication system were also present. Last but not least, new urbanization relevance countermeasure analysis and suggestions were put forward at the end of this article.

Keywords: Urban Area; Climate Change; Adaption; Lifeline System

JEL Classification: P28, Q54, R58

(责任编辑:朱静静)

(上接第41页)

mismatch rate and reducing the total cost of environmental governance. Taking Beijing and Tianjin as an example, the Copula joint distribution, random distribution and normal distribution were used to air pollution prediction. The results show that the allocation of resources to reduce the mismatch rate is more conducive to the Pareto optimal allocation. The distribution of atmospheric pollution in Beijing and Tianjin had a thick lower tail correlation. The forecast data based on Normal-Copula was closer to the actual results.

Keywords: Allocation of Pollution Control Resource; Pareto Improvement; Copula Function; Air Quality Index

JEL Classification: P28, Q44, Q56

(责任编辑:卢玲)