

· 公共管理与行政管理 ·

协同发展视域下京津冀大气污染横向生态补偿研究



□ 刘慧文

[摘 要] 目前中国各省大气污染生态补偿实践快速发展,但在省际横向生态补偿方面进展缓慢,不利于区域协同发展和治理工作的推进。以大气污染典型区域京津冀地区为例,基于区域协同减排优化模型提出了省际转移支付和省内资金分配相结合的补偿模式,给出了成本最小化情景下京津冀省际和省内各城市的生态补偿标准。研究表明,京津冀可以通过协同减排节约减排成本,以2015~2020年京津冀地区SO₂和NO_x减排为例,通过协同减排节约的减排成本约占京津冀地区GDP总量的0.07%。在最优减排方案下,河北省替北京市和天津市承担了部分减排任务,为了兼顾区域公平,北京市和天津市需要对河北省进行经济补偿。河北省内各城市中,唐山市和邯郸市获得的补偿资金最多。研究成果为大气污染横向生态补偿机制建设提供了定量参考和政策启示。

[关键词] 协同发展;跨区域;京津冀;大气污染;横向生态补偿

[中图分类号] F205; X196

[文献标识码] A

[DOI] 10.14071/j.1008-8105(2025)-3009

污染物的流动性导致不同省市间的大气污染相互影响,因此依靠行政区各自为政的环境管理体制难以解决跨区域的大气污染问题^[1-2]。利用经济手段调节相关地区利益关系、促进环境保护的生态补偿制度,在解决跨区域环境问题中发挥着重要作用^[3-5],广泛应用于流域^[6-8]、土地^[9-11]、森林^[12-14]、草原^[15-17]等不同领域的环境治理问题。

党的二十大报告提出“完善生态保护补偿制度”,党的二十届三中全会进一步指出“推进生态综合补偿,健全横向生态保护补偿机制”。目前中国各省大气污染生态补偿实践快速发展,自2014年《山东省环境空气质量生态补偿暂行办法》颁布以来,湖北、河南、陕西、河北等省份陆续实施相关政策,但省际横向生态补偿却进展缓慢。在此背景下,探索和完善大气污染省际横向生态补偿模式,对于健全横向生态保护补偿机制和推进区域协同发展具有重要意义。

一、文献综述

近年来,针对大气污染跨区域横向生态补偿问题,相关研究提出在通过区域协同减排实现区域总成本最小的基础上,进一步通过地区间经济补偿的方式实现区域公平^[18-20]。唐湘博等^[18]定量测算了总成本最小化情景下,长株潭城市群各地区SO₂协同减排的减排量和经济补偿标准。王立平等^[19]依据京津冀各地区SO₂治理成本的不同,以治理成本最低的地区作为雾霾治理任务的主要承担者,

[收稿日期] 2025-01-07

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(72474188);天津行政学院青年马克思主义者培育项目(23QMWT06)。

[作者简介] 刘慧文,天津行政学院公共管理教研部讲师。

[引用格式] 刘慧文. 协同发展视域下京津冀大气污染横向生态补偿研究[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2025, 27(2): 95-105. DOI: 10.14071/j.1008-8105(2025)-3009.

[Citation Format] LIU Hui-wen. Research on horizontal ecological compensation for air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region from the perspective of collaborative development[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China(Social Sciences Edition), 2025, 27(2): 95-105. DOI: 10.14071/j.1008-8105(2025)-3009.

进一步基于机会成本法核算了地区间的补偿标准。然而,现有文献主要针对 SO_2 展开研究,对其他污染物的关注不足。随着 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧成为中国大气污染的主要污染源^[21],作为 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧的共同前体物, NO_x 等其他污染物的研究有待完善。

从评估指标来看,现有研究主要根据空气质量改善程度^[22]、减排成本差异^[23-24]、产出损失^[19]等不同类型指标测算补偿标准。Cui等^[22]通过对国内空气质量生态补偿案例进行梳理,指出现有补偿制度主要按照每下降单位污染物浓度设置5万元~80万元不等的补偿标准。Liu等^[24]通过构建大气污染区域协同治理博弈模型,给出了区域合作治理的减排成本,进而采用三种经典的成本分担方法给出大气污染治理成本分配及补偿方案。此外,GDP、人口、支付能力等社会经济指标广泛用于大气污染、碳排放等各领域减排责任分摊及区域补偿研究^[25-27]。在评估过程中,现有文献主要依据单一类型指标设置补偿标准,但生态补偿政策制定要兼顾环境、经济等多方面因素^[28-30],仅考虑单一指标的补偿标准设置方式在科学性和合理性方面有待进一步完善。

从区域尺度来看,目前相关研究主要关注省份之间或城市之间的减排及补偿问题。袁润松等^[25]根据各省份的减排潜力将 SO_2 减排总目标在省际间进行分解并设计出相配套的成本分担和补偿机制。唐湘博等^[18]对长沙、株洲、湘潭三市的大气污染协同减排及补偿问题进行了研究。魏巍贤等^[20]、薛俭等^[23]对北京市、天津市和河北省的大气治理成本及成本分担问题进行了研究。但现有研究仍局限于省份层面或城市之间同级行政区域间的补偿,对于省际横向生态补偿过程中省内各城市如何补偿缺乏进一步探讨。在流域和土地生态补偿领域,信息熵法广泛用于横向生态补偿中省内各城市补偿资金分配的评估^[31-33]。Cheng等^[32]基于机会成本法确定补偿额度,并采用信息熵法探讨了新安江流域各区县的总补偿支付和资金分配情况,为跨省市补偿资金分配问题提供了参考方法。

综合来看,尽管现有文献尝试给出大气污染跨区域生态补偿方案,但在研究对象上,多数研究仅关注了 SO_2 污染, NO_x 等污染物的研究有待完善;从研究过程来看,已有研究主要关注空气质量、减排成本等某项因素的影响,依据单一指标进行补偿标准评估;从研究的区域尺度来看,现有研究主要关注省份之间或城市之间的补偿问题,对于跨省补偿过程中省内各城市如何补偿有待进一步细化。鉴于此,该研究以大气污染典型区域京津冀地区为例,基于区域协同减排优化模型测算了京津冀 SO_2 和 NO_x 省际协同减排方案,进一步提出了省际转移支付和省内资金分配相结合的跨区域横向生态补偿模式,基于信息熵模型评估了综合各类环境经济指标影响的补偿标准,为大气污染横向生态补偿政策的完善提供了借鉴和参考。

二、研究设计

(一) 横向生态补偿机制设计

本文提出省际转移支付和省内资金分配相结合的大气污染横向生态补偿机制。具体流程如下:(1)减排目标分配:在总量减排目标下,中央统筹安排省际间的协作减排,基于区域协同减排优化模型确定成本最小化情景下各地区的减排量、直接减排成本;(2)减排成本分摊:构建耦合GDP、人口、污染物减排量等环境经济指标的成本分摊信息熵模型,对直接减排总成本进行分摊,得到各省份的分摊成本。分摊成本是综合考虑各省份的经济水平、空气质量、减排贡献等环境经济指标后,各省份应当分摊的减排成本;(3)省际补偿:对分摊成本超过直接减排成本的省份征收补偿资金,用于补偿分摊成本低于直接减排成本的省份,补偿金额为各省份分摊成本和直接减排成本的差额;(4)省内资金分配:根据各城市的经济水平、空气质量、减排贡献等环境经济指标,构建综合考虑经济、环境、社会因素的补偿资金分配信息熵模型,确定各城市的补偿资金分配权重,进而给出各城市应获得的补偿金额。京津冀大气污染省际横向生态补偿机制设计路线如图1所示。

(二) 区域协同减排优化模型

减排成本使用计量经济学方法,根据薛俭等^[23]的研究,大气污染减排成本模型可以表示为:

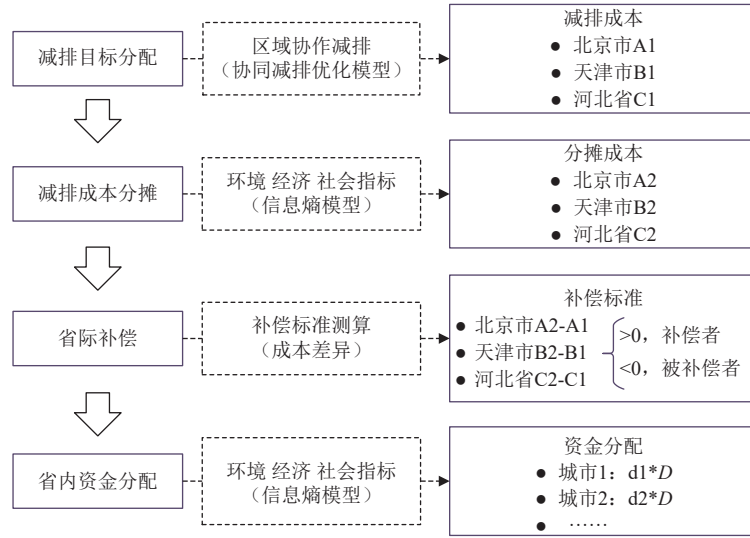


图1 京津冀大气污染横向生态补偿机制设计路线图

$$C_r^i = f\left(E_r, \frac{O_r^i}{I_r^i}, S_r\right) \quad (1)$$

其中, C_r^i 为地区 r 污染物 i 的减排成本, E_r 为 r 地区的废气排放总量, (O_r^i/I_r^i) 表示地区 r 污染物 i 的去除率, O_r^i 和 I_r^i 分别为污染物的出口浓度和进口浓度, S_r 为地区 r 的区域特征。根据世界银行政策研究和环境保护部相关研究成果, 选用固定弹性参数对大气污染物减排成本模型进行简化^[19], 得到大气污染物减排成本函数的回归公式:

$$C_r^i = \lambda_r \cdot E_r^\alpha \cdot \left(\frac{O_r^i}{I_r^i}\right)^\beta \cdot S_r \quad (2)$$

其中, λ 、 α 、 β 为结构参数。对上式进行取对数处理, 得到线性化的减排成本模型:

$$\ln C_r^i = \ln \lambda_r + \alpha \ln E_r + \beta \ln \left(\frac{O_r^i}{I_r^i}\right) + \ln S_r \quad (3)$$

上述模型反映了污染物减排成本与去除率、废气排放总量的函数关系, 污染物去除率一般指工厂的污染物去除情况, 借鉴王立平等^[19]的研究, 反映到区域层面, 上述模型可以改写为:

$$\ln C_r^i = \ln \lambda_r + \alpha \ln E_r + \beta \ln P_r^i + \ln S_r \quad (4)$$

其中, P_r^i 表示地区 r 污染物 i 的去除量。一般认为某个地区的地区特征 (S_r) 在研究期内保持不变, 在模型中为常数, 因此令 $\ln \omega_r = \ln \lambda_r + \ln S_r$ 代入上式, 得到:

$$\ln C_r^i = \ln \omega_r + \alpha \ln E_r + \beta \ln P_r^i \quad (5)$$

利用上述模型, 基于大气污染物废气排放总量、污染物去除量和废气治理设施运行费用数据, 最终得到各地区减排成本函数:

$$C_r^i = \lambda_r \cdot E_r^\alpha \cdot P_r^{i\beta} \cdot S_r \quad (6)$$

以总成本最小化为目标, 以区域减排总量目标为约束, 建立大气污染区域协同减排优化模型:

$$\min TC = \sum_{r=1}^n \sum_{i=1}^m C_r^i \quad (7)$$

$$C_r^i = f(E_r, P_r^i, S_r) \quad (8)$$

$$\sum_{r=1}^n P_r^i = \sum_{r=1}^n (E_r^{i0} - e_r^i) \quad (9)$$

$$l \cdot P_r^{i0} \leq P_r^i \leq u \cdot P_r^{i0} \quad (10)$$

$$0 < l < u < 1 \quad (11)$$

式(7)是目标函数,表示大气污染减排总成本最小,总成本为各地区所有污染物减排成本之和。式(7)中, n 为区域总数, m 为污染物种类总数, C_r^i 表示地区 r 污染物 i 的减排成本。 C_r^i 与区域废气排放总量 E_r 、污染物去除量 P_r^i 和地区特征 S_r 有关,表达式如式(8)所示。式(9)为减排总量约束,等式左边表示各地区污染物 i 的减排量之和,等式右边表示所有地区污染物的目标减排量。其中, E_r^{i0} 为地区 r 污染物 i 的基年产生量, e_r^i 表示地区 r 污染物 i 的目标排放量。式(10)和式(11)是减排量的现实约束, l 和 u 表示污染物去除比例。根据Liu等^[24]的研究,在污染物去除率较低(40%以下)时,各地区去除污染物比较容易,减排成本也相对较低,可以自己治理这部分污染物,当污染物去除率较高(90%以上)时,减排成本会显著上升,可将减排责任分配到其他地区,所以该研究中 l 和 u 分别取0.4和0.9。

(三)信息熵模型

影响因素指标的选取是信息熵模型构建的关键^[34-35],基于可行性、异质性、代表性等原则并参考前人研究,本文最终选取六项影响因素指标建立了包含1个目标层(减排总成本分摊或补偿资金总量分配)和3个准则层(经济发展水平、社会公平、环境治理)的指标体系,具体指标见表1。

表 1 信息熵模型影响因素指标体系

目标	准则	指标
减排总成本分摊或补偿资金总量分配	经济发展水平	人均GDP
		第二产业比重
	社会公平	人口
		工业SO ₂ 减排量
	环境治理	工业NO _x 减排量 年均PM _{2.5} 浓度

以补偿资金分配为例介绍信息熵模型构建过程。假设各地区的补偿资金总量分配集合为 $X_i = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $i \in (1, n)$, 补偿资金分配影响因子的指标集表示为 $X_j = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, $j \in (1, m)$, 其中, n 表示不同地区的数量, m 表示不同指标的数量。根据补偿资金总量分配集合和影响因子指标集构造补偿资金分配原始判断矩阵 A_{ij} , A_{ij} 是一个 $n \times m$ 的矩阵:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, x_{ij} 表示第 i 个地区第 j 个指标值。根据正向影响因素和负向影响因素,对指标进行无因次化处理:

$$X_{ij} = \left\{ \frac{I_{ij} - \min\{I_{ij}\}}{\max\{I_{ij}\} - \min\{I_{ij}\}} \right\}, X_{ij} \in (0, 1) \quad (13)$$

$$X_{ij} = \left\{ \frac{\max\{I_{ij}\} - I_{ij}}{\max\{I_{ij}\} - \min\{I_{ij}\}} \right\}, X_{ij} \in (0, 1) \quad (14)$$

式(13)和式(14)分别为正向影响因素和负向影响因素指标归一化公式。其中, $\min\{I_{ij}\}$ 为*i*地区*j*指标的最小值; $\max\{I_{ij}\}$ 为*i*地区*j*指标的最大值; I_{ij} 为*i*地区*j*指标的原始指标值。进一步得到新的标准化矩阵:

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (15)$$

指标的信息熵可以表示为:

$$H(X_j) = -K \sum_{i=1}^n (p_{ij} \ln(p_{ij})) \quad (16)$$

其中, $0 \leq H(X_j) \leq 1$, $p_{ij} = X_{ij} / \sum_{i=1}^n X_{ij}$, p_{ij} 是表示指标属性的值, 体现了地区在指标特征下的属性信息。根据熵增定理, 对于*j*指标, 其指标属性值 p_{ij} 越大, 说明该指标在补偿分配中起的作用越大, 反之则作用越小。常数参量*K*由补偿区域的总数计算得出, $K = 1/\ln(n)$, $K > 0$ 。若 $p_{ij} = 0$, 规定 $p_{ij} \ln(p_{ij}) = 0$, p_{ij} 满足 $\sum p_{ij} = 1$ 。由于指标的信息量与其熵值成反比, 我们将信息熵的效用定义为:

$$d_j = 1 - H(X_j) \quad (17)$$

补偿资金分配的信息熵反映了各项指标的重要性, 各指标的权重 $w_j = d_j / \sum_{j=1}^m d_j$, 各指标的权重向量分布为 $W_j = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 。基于补偿资金分配集合的各指标值与对应的权重, 得到补偿资金分配中各地区的综合得分:

$$C_i = \sum_{j=1}^m X_{ij} \cdot W_j \quad (18)$$

C_i 反映了被分配对象的综合属性和相对分配额度, 对 $\alpha_i = C_i / \sum_{i=1}^n C_i$ 进一步处理获得每个分配对象的分配系数, 假设每个地区的分配比例为 α_i , 则 $\alpha_i = C_i / \sum_{i=1}^n C_i$ 。

各省份或直辖市的分摊成本为 $ACO_i = ACO \times \alpha_i$, 其中, ACO 为所有地区的减排总成本。在减排成本分摊的基础上, 根据各省份直接减排成本和分摊成本的差额确定省际补偿标准。省际补偿标准的具体计算公式为:

$$PAY_i = RCO_i - ACO_i \quad (19)$$

其中, RCO_i 为地区协同减排的直接减排成本, ACO_i 为信息熵原则下地区的分摊成本, PAY_i 地区的*i*补偿标准, 当 PAY_i 为正值时, 地区*i*为被补偿者, 接受相应的补偿金额; 当 PAY_i 为负值时, 地区*i*为补偿者, 要缴纳对应的补偿金额。基于上述测算方法可以获得北京市、天津市和河北省的省际补偿标准, 针对补偿资金在河北省内的分配, 各城市补偿资金的分配额度 $V_i = V \times \alpha_i$, 其中, V 为省内所有城市获得的补偿资金总额。

(四) 数据来源

由于工业排放是大气污染物的主要排放源, 结合数据的可得性, 该研究基于工业污染物排放及处理费用数据进行大气污染减排成本评估。北京市、天津市、河北省的废气排放总量、工业 SO_2 去

除量、工业 NO_x 去除量、脱硫设施运行费用、脱硝设施运行费用数据均来自《中国环境年鉴》。

信息熵模型涉及的指标包括:人均GDP、人口、第二产业比重、 SO_2 和 NO_x 减排量、年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度。京津冀13个城市(北京、天津、石家庄、唐山、秦皇岛、邯郸、邢台、保定、张家口、承德、沧州、廊坊、衡水)的人均GDP、人口、第二产业比重、 SO_2 和 NO_x 减排量数据均来自《中国城市统计年鉴》, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据来自中国空气质量在线监测分析平台(<https://www.aqistudy.cn/historydata/>)。

三、结果分析

(一)京津冀协同减排方案

1. 减排成本分析

基于京津冀地区废气排放总量、 SO_2 和 NO_x 去除量、减排设施运行成本数据,得到各地区 SO_2 和 NO_x 减排成本函数。拟合北京市、天津市、河北省 SO_2 和 NO_x 减排成本函数,可以得到京津冀地区 SO_2 和 NO_x 累计减排成本曲线(见图2)。

由图2可知,京津冀地区中,北京市的 SO_2 和 NO_x 减排成本最高,远高于天津市和河北省;随着减排量增多,河北省的减排成本最低,且 NO_x 的减排成本普遍高于 SO_2 减排成本。北京市作为国家的首都,经济系统比较复杂,产业关联紧密,某个产业的减排可能对整体造成较大影响,因此,京津冀地区中北京市 SO_2 和 NO_x 减排成本都是最高的。对于天津市和河北省,当 SO_2 或 NO_x 的去除量低于40万吨时,天津市的减排成本略低于河北省,随着 SO_2 或 NO_x 的去除量增大,河北省成为减排成本最低的地区,且远低于北京市和天津市,说明京津冀地区中河北省的 SO_2 和 NO_x 边际减排成本最低,有较大的减排潜力。根据《中国环境年鉴》中 SO_2 和 NO_x 的排放量、去除量数据,2011~2015年京津冀地区 SO_2 去除率为62%~85%, NO_x 去除率仅为10%~49%。因此,与 NO_x 相比,京津冀地区 SO_2 减排技术已相对成熟,减排效率较高且减排成本较低,而 NO_x 减排技术有待提升,减排潜力较大。

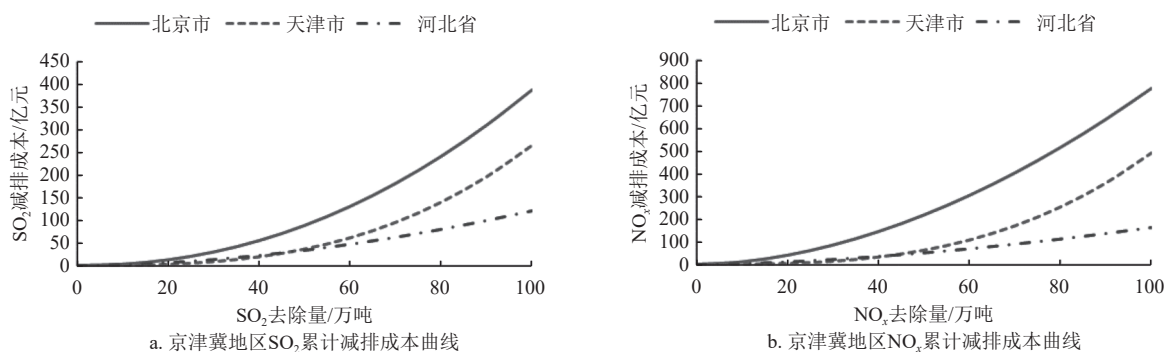


图2 京津冀地区 SO_2 和 NO_x 累计减排成本曲线

2. 减排方案分析

基于减排成本函数建立大气污染区域协同减排优化模型。《中国环境年鉴》中 SO_2 和 NO_x 的排放量、去除量数据更新至2015年,因此,以2015年为基准年,对京津冀大气污染协同减排方案及减排成本进行评估。根据《中国环境年鉴》中 SO_2 和 NO_x 的产生量和排放量数据可知,2015年京津冀地区 SO_2 和 NO_x 平均去除率分别为70.71%、43.78%。根据《中国统计年鉴》数据可知,2015~2020年京津冀地区 SO_2 和 NO_x 排放总量分别为421.92万吨、748.95万吨,按照 SO_2 和 NO_x 去除率分别为70.71%、43.78%进行估算,则2015~2020年京津冀地区对应的 SO_2 和 NO_x 去除量应为1018.56万吨、583.23万吨。在去除总量不变的情况下,将以上数据代入区域协同减排优化模型,得到总成本最小化情景下京津冀地区 SO_2 和 NO_x 协同减排方案及各地区减排成本。2015~2020年京津冀地区 SO_2 和 NO_x 最优减排方案和实际减排的对比情况如图3所示。

由京津冀地区SO₂和NO_x减排成本分析可知,随着减排量增多,河北省在京津冀三个地区中减排成本最小,因此,在最优减排方案下河北省承担了更多的减排任务。如图3所示,与实际减排情况相比,最优减排方案下河北省的SO₂和NO_x减排量占总减排量的比例分别增加了5.69%、1.91%,北京市SO₂和NO_x减排量占总减排量的比例分别减少了1.56%、0.83%,天津市SO₂和NO_x减排量占总减排量的比例分别减少了4.13%、1.08%。北京市、天津市分别节约31.71亿元、256.55亿元SO₂减排成本,河北省需要多付出12.93亿元SO₂减排成本。北京市、天津市分别节约41.22亿元、57.08亿元NO_x减排成本,河北省需要多付出1.92亿元NO_x减排成本。河北省SO₂和NO_x的实际减排量分别占京津冀地区SO₂和NO_x减排总量的86.90%和77.89%,而在最优减排方案下,河北省承担的SO₂和NO_x减排量分别占京津冀地区SO₂和NO_x减排总量的92.59%和79.80%。在污染物去除总量不变的情况下,通过区域协同减排,京津冀地区可分别节约243.70亿元SO₂减排成本和96.38亿元NO_x减排成本,2015~2020年节约的总成本约占京津冀地区2015~2020年GDP总量的0.07%。

以上结果表明,可以根据地区间的减排成本差异,通过在不同地区间进行减排责任分配,实现以最低的减排成本实现减排目标,提高整体减排效率。为了兼顾区域公平,需要对承担较多减排责任的地区进行经济补偿。在最优减排方案下,河北省承担了更多的减排任务,额外付出了减排成本,为了实现区域公平,北京市和天津市需要对河北省进行一定的经济补偿。

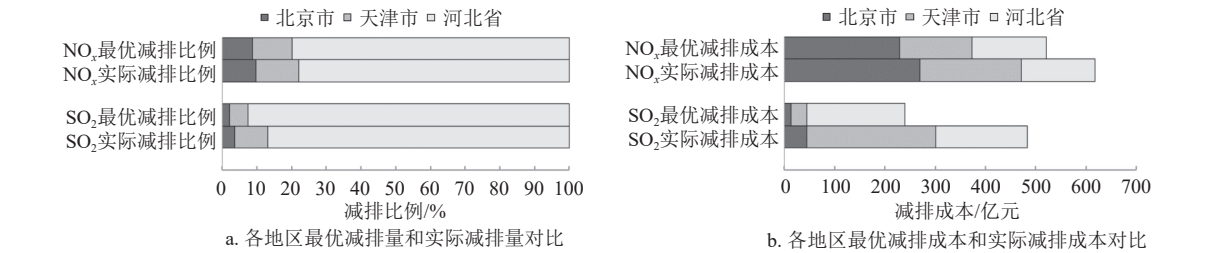


图3 京津冀地区SO₂和NO_x最优减排方案 and 实际减排情况对比

(二) 京津冀补偿方案

1. 省际补偿标准

本文基于信息熵模型评估了京津冀地区SO₂和NO_x减排总成本在北京市、天津市和河北省间的分摊情况。减排总成本采用京津冀地区大气污染区域协同减排最优减排方案下SO₂和NO_x的减排总成本(760.73亿元),最终给出北京市、天津市和河北省的减排成本分摊情况。进一步根据各地区减排成本和分摊成本的差额确定京津冀地区大气污染协同减排的省际补偿标准,结果见表2。

表 2 京津冀协同减排省际补偿标准			亿元
地区	减排成本	分摊成本	补偿标准
北京市	242.59	396.32	-153.73
天津市	175.32	315.69	-140.37
河北省	342.82	48.72	294.10

(注: 正值表示该地区为被补偿者, 接受相应的补偿金额; 负值表示该地区是补偿者, 要缴纳对应的补偿金额。)

如表2所示,北京市和天津市需要对河北省进行补偿,2015~2020年成本最小化的京津冀协同减排方案中,北京市、天津市需要分别缴纳153.73亿元、140.37亿元补偿资金用于弥补河北省在协同减排中的减排损失。这是因为在最优减排方案下,为了提高整体减排效率,降低减排总成本,河北省替北京市和天津市承担了部分减排责任,付出了更高的减排成本,因此,北京市和天津市需要对河北省进行补偿,以弥补河北省额外的减排损失。其中,北京市和天津市应缴纳的补偿资金分别占2015~2020年北京市和天津市GDP总量的0.09%、0.14%,河北省接受的补偿资金约占2015~2020年

河北省GDP总量的0.14%。根据研究结果,2015~2020年京津冀协同减排及省际补偿过程中应缴纳的补偿资金总额为294.10亿元,占2015~2020年京津冀地区GDP总量的0.06%,而2015~2020年京津冀协同减排节约的减排成本占京津冀地区GDP总量的0.07%。因此,即使加上京津冀地区省际补偿所付出的转移支付成本,区域协同减排仍然可以从总量上节约减排成本,提高整体的减排效率。

2. 省内补偿资金分配

目前中国各省大气污染生态补偿实践快速发展,省间跨界补偿实践却进展缓慢,相关研究也主要关注省份之间的补偿^[19-20],对于省内各城市补偿资金如何分配缺乏进一步探讨。该研究借鉴流域横向生态补偿经验^[32],在大气污染省际横向补偿的基础上,进一步基于信息熵法对补偿资金在河北省内各城市间的分配权重进行测算,提出了省际转移支付和省内资金分配相结合的大气污染跨区域补偿模式。补偿资金分配总额采用上文中河北省获得的来自北京市和天津市的补偿资金(294.10亿元),基于河北省内11个城市的六项影响因素指标(见表1)进行分配权重测算,最终给出各城市接受的补偿金额。补偿资金在河北省各城市的分配结果见图4。

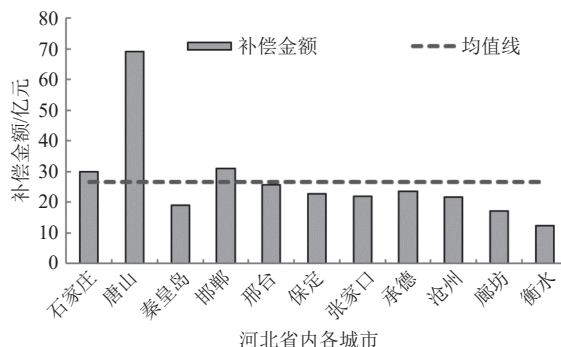


图4 河北省内各城市补偿资金分配情况

由图4可知,2015~2020年京津冀协同减排方案下,河北省各城市获得的补偿资金在12.27

亿~69.12亿元之间浮动。其中,唐山市获得的补偿资金最多(69.12亿元),获得的补偿资金约占其2015~2019年GDP总量的0.21%。其次分别是邯郸市(30.99亿元)、石家庄市(29.88亿元)和邢台市(25.79亿元),获得的补偿资金约占各自2015~2019年GDP总量的0.18%、0.08%和0.26%。在所有城市中,衡水市、廊坊市和秦皇岛市获得的补偿资金最少,分别为12.27亿元、17.16亿元、18.93亿元。综合考虑各地区减排责任及环境经济影响的情况下,河北省内各城市获得的补偿资金由多到少排序依次为:唐山市>邯郸市>石家庄市>邢台市>承德市>保定市>张家口市>沧州市>秦皇岛市>廊坊市>衡水市。

河北省各城市中,唐山市获得的补偿资金最多,这与唐山市较高的工业SO₂减排量和工业NO_x减排量有关,同时唐山市也是所有城市中第二产业比重最高的地区,这些指标对于唐山市获得更多的补偿资金也起到一定的正向作用。邯郸市获得的补偿资金较多,一方面,在所有城市中,邯郸市的第二产业比重仅次于唐山市,工业SO₂减排量仅次于唐山市和石家庄市,对大气污染的治理投入相对较多;另一方面,邯郸市的人口仅次于保定市,因大气污染减排而受到发展限制的人数较多,因此需要接受较高的补偿。石家庄市的工业SO₂减排量和工业NO_x减排量在所有城市中均排名第二,仅次于唐山市,对大气污染的治理投入相对较多,因此,石家庄市获得的补偿资金较多。邢台市的人口相对较多,在所有地区中排名第四,因大气污染减排而受到发展限制的人数较多;且邢台市重工业发达,工业SO₂减排量和工业NO_x减排量在所有地区中均排名第四,因污染治理投入的资金较多。因此,综合各项因素来看,邢台市也可以获得较高的补偿金额。与其他地区相比,衡水市的工业SO₂减排量最低,且工业NO_x减排量和第二产业比重均排名倒数第三位,减排贡献较小;廊坊市和秦皇岛市的各项因素指标值都处于比较靠后的水平,因此,这些地区获得的补偿资金较少。可以发现,获得补偿资金较多的城市主要为钢铁、电力等重工业发达的地区,这些地区为满足其他地区的需求承担了

大量污染物排放,所以需要获得较高的经济补偿以弥补其减排损失。

(三) 讨论

北京市、天津市以及河北省的唐山市、廊坊市、保定市和沧州市2015年研究建立了“2+4”大气污染防治核心区结对合作机制,北京市支持廊坊市和保定市4.6亿元,天津市支持唐山市和沧州市4亿元开展大气治理工作,是大气污染联防联控协作和补偿机制的探索,共涉及补偿资金8.6亿元。

2018年,《河北省城市及县(市、区)环境空气质量通报排名和奖惩问责办法(试行)》出台,提出通过政府间财政转移支付的形式扣罚空气质量改善相对较差的城市补偿资金,用于奖励空气质量改善状况较好的城市。根据河北省生态环境厅公布的全省环境空气质量排名及奖惩情况,2019年全年河北省共执行补偿资金7440万元。

根据本文计算结果,2015~2020年京津冀协同减排年均补偿额度为49.02亿元。无论京津冀“2+4”核心区的结对合作机制还是河北省的空气质量奖惩问责办法,相关政策涉及的补偿金额远低于本文基于各类环境经济指标综合评估的补偿标准。本文研究结果与现行补偿政策的差距,关键在于评估指标的差异。现行政策主要基于空气质量指标评估补偿标准,本文在现有基础上进一步纳入人口、GDP等社会经济指标,涵盖的影响范围更加广泛,评估的补偿标准高于目前基于单一指标的补偿标准。因此,现行大气污染生态补偿相关制度虽然对空气质量改善起到一定的激励效果^[36],但补偿金额还达不到区域间应有的横向补偿效果,补偿标准的评估体系仍有待进一步完善。

四、结论与启示

京津冀大气污染区域协同减排方案的研究结果表明,京津冀可以通过地区间协作及经济补偿从总体上节约减排成本、提高减排效率。由于受属地管理模式限制,我国现行的大气污染生态补偿局限于省市内部的纵向转移支付制度,缺乏区域间横向合作及补偿机制。因此,本文建议建立大气污染省际生态补偿制度,以通过区域合作提高大气污染的治理效率。为了实现省际间的合作,可以通过中央统筹和省级统筹相结合的管理模式,先由中央统筹省际间的转移支付,再由省级层面统筹省内各城市的补偿资金发放;也可以通过成立专门的跨区域管理机构负责不同地区间协作与补偿的组织和协调工作,包括减排目标的制定、减排任务的分配、补偿资金的征收及发放等,保证做到专款专用,以推进大气污染省际生态补偿机制建设。

京津冀大气污染生态补偿标准的评估结果表明,现行的大气污染生态补偿相关制度实施的补偿金额远低于研究评估的补偿标准,达不到区域间应有的补偿效果,补偿标准的评估体系有待进一步完善。因此,建议在现行政策的基础上进一步考虑区域环境现状和经济发展水平,完善补偿标准的评估体系,提高补偿标准设置的科学性和合理性。本文选取了人均GDP、人口、第二产业比重、工业SO₂减排量、工业NO_x减排量、年均PM_{2.5}浓度共六项指标测算补偿资金在各地区的分配权重,该评估体系具有一定的灵活性,可以结合实际情况对指标进行增删。例如,对于受气象因素影响较大的区域,可以将气象相关指标纳入核算体系;对于涉及VOCs等污染物的减排方案,可以将VOCs纳入核算体系。建议未来结合地区特征选取补偿标准评估的指标体系,为各地区补偿政策的实施提供更有针对性的指导。

参考文献

- [1] 陈诗一,陈登科. 雾霾污染、政府治理与经济高质量发展[J]. 经济研究, 2018, 53(2): 20-34.
- [2] 李建呈,王洛忠. 区域大气污染联防联控的政策效果评估——基于京津冀及周边地区“2+26”城市的准自然实验[J]. 中国行政管理, 2023(1): 75-83.
- [3] 景守武,张捷. 跨省流域横向生态补偿与城市水环境全要素生产率——以浙皖新安江流域为例[J]. 城市问题, 2023(1): 89-99.
- [4] HANSEN K, DUKE E, BOND C, et al. Rancher preferences for a payment for ecosystem services program in southwestern Wyoming[J]. *Ecological Economics*, 2018, 146: 240-249.
- [5] OBENG E A, AGUILAR F X. Value orientation and payment for ecosystem services: perceived detrimental consequences lead to willingness-to-pay for ecosystem services[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 458-471.
- [6] 李坦,徐帆,祁云云. 从“共饮一江水”到“共护一江水”——新安江生态补偿下农户就业与收入的变化[J]. 管理

世界, 2022, 38(11): 102-124.

[7] 郝永勤, 王景群. 市场化、多元化视角下我国流域生态补偿机制研究[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2020, 22(1): 54-60.

[8] 杨永亮, 王维, 覃琼霞. 跨界流域生态补偿与受偿县域经济增长——基于新安江第三轮生态补偿的准自然实验[J]. 中国环境科学, 2024, 44(5): 2923-2936.

[9] 赵坤, 杜澍, 沈迟. 自然保护区管控对原住民民生与生态移民意愿影响[J]. 城市发展研究, 2021, 28(9): 50-57+65.

[10] 包贵萍, 梁小亮, 梁颖, 等. 南方红壤丘陵耕地生态修复补偿标准研究[J]. 资源科学, 2019, 41(2): 247-256.

[11] 谢花林, 程玲娟. 地下水漏斗区农户冬小麦休耕意愿的影响因素及其生态补偿标准研究——以河北衡水为例[J]. 自然资源学报, 2017, 32(12): 2012-2022.

[12] 马橙, 高建中. 森林生态补偿、收入影响与政策满意度——基于陕西省公益林区农户调查数据[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(11): 58-64.

[13] 朱臻, 黄晨鸣, 徐志刚, 等. 南方集体林区林农风险偏好对于碳汇供给意愿的影响分析——浙江省风险偏好实验案例[J]. 资源科学, 2016, 38(3): 565-575.

[14] 聂承静, 刘晓成, 姜群鸥, 等. 基于合作治理理论的我国区域多层次复合市场化森林生态补偿模式构建探索[J]. 世界林业研究, 2022, 35(6): 120-126.

[15] 胡振通, 柳荻, 靳乐山. 草原生态补偿: 生态绩效、收入影响和政策满意度[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(1): 165-176.

[16] 曾贤刚, 段存儒, 虞慧怡. 社会资本对生态补偿绩效的影响机制研究——以锡林郭勒盟草原生态补偿为例[J]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 879-888.

[17] 杨莉, 乔光华. 基于牧民受偿意愿的生态保护红线区草原生态补偿标准研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(11): 55-60.

[18] 唐湘博, 陈晓红. 区域大气污染协同减排补偿机制研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(9): 76-82.

[19] 王立平, 陈飞龙, 杨然. 京津冀地区雾霾污染生态补偿标准研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2518-2524.

[20] 魏巍贤, 王月红. 京津冀大气污染治理生态补偿标准研究[J]. 财经研究, 2019, 45(4): 96-110.

[21] 薛文博, 许艳玲, 史旭荣, 等. 我国大气环境管理历程与展望[J]. 中国环境管理, 2021, 13(5): 52-60.

[22] CUI L, DUAN H, MO J, et al. Ecological compensation in air pollution governance: China's efforts, challenges, and potential solutions[J]. *International Review of Financial Analysis*, 2021, 74: 101701.

[23] 薛俭, 谢婉林, 李常敏. 京津冀大气污染治理省际合作博弈模型[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(3): 810-816.

[24] LIU X, WANG W, WU W, et al. Using cooperative game model of air pollution governance to study the cost sharing in Yangtze River Delta region[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 301: 113896.

[25] 袁润松, 丰超, 王苗, 等. 中国区域间节能减排责任分担及成本补偿机制设计——基于潜力视角[J]. 经济问题探索, 2016(5): 38-43.

[26] 刘晓. 基于公平与发展的中国省区碳排放配额分配研究[J]. 系统工程, 2016, 34(2): 64-69.

[27] 郑立群. 中国各省区碳减排责任分摊——基于零和收益DEA模型的研究[J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2087-2096.

[28] EZZINE-DE-BLAS D, CORBERA E, LAPEYRE R. Payments for environmental services and motivation crowding: towards a conceptual framework[J]. *Ecological Economics*, 2019, 156: 434-443.

[29] 景熠, 杜鹏琦, 曹柳. 区域大气污染协同治理的府际间信任演化博弈研究[J]. 运筹与管理, 2021, 30(5): 110-115.

[30] 耿翔燕, 葛颜祥, 张化楠. 基于重置成本的流域生态补偿标准研究——以小清河流域为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(1): 140-147.

[31] GUAN X, LIU W, CHEN M. Study on the ecological compensation standard for river basin water environment based on total pollutants control[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 446-452.

[32] CHENG Y, WU D, BIAN Y. A systematic approach of determining compensation and allocation for river basin water environment based on total pollutants control[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 271: 110896.

[33] LI H, ZHAO Y, ZHENG F. The framework of an agricultural land-use decision support system based on ecological environmental constraints[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 717: 137149.

- [34] 任静. 提高多指标决策客观性的赋权方法[J]. 管理评论, 2012, 24(5): 160-169.
- [35] 程辉, 张延军, 吴旭影, 等. 基于ArcGIS与信息熵法的吉林省城市用地变化分析[J]. 中国软科学, 2020(S1): 181-186.
- [36] 淦振宇, 踪家峰. 生态补偿能改善城市空气质量吗?[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(10): 118-129.

Research on Horizontal Ecological Compensation for Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region from the Perspective of Collaborative Development

LIU Hui-wen

Abstract Provinces in China have made remarkable development in introducing the ecological compensation for air pollution. However, the cross-regional ecological compensation for air pollution develops slowly, which is not conducive to the in-depth promotion of air pollution control. Taking the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, a typical area of air pollution, as an example, this study proposes a compensation mode that combines inter-provincial transfer payments with intra-provincial funds allocation based on the regional collaborative emission reduction optimization model. The compensation standards under a cost-minimization scenario for both inter-provincial and intra-provincial cities are calculated. The results show that the BTH region could save emission reduction costs through regional collaborative emission reduction. Taking the emission reduction of SO_2 and NO_x in the BTH region from 2015 to 2020 as an example, the emission reduction cost saved through collaborative emission reduction accounted for approximately 0.07% of the total GDP of the BTH region. Under the optimal emission reduction plan, Hebei province undertook a part of the emission reduction task for Beijing and Tianjin. In order to promote regional equity, economic compensation from Beijing and Tianjin was vital to alleviate the cost burden on Hebei province. Among the cities in Hebei province, Tangshan and Handan received the most compensation funds. The results provide a quantitative reference and policy enlightenment for the construction of horizontal ecological compensation mechanism for air pollution.

Key words collaborative development; cross regional; Beijing-Tianjin-Hebei region; air pollution; horizontal ecological compensation

编辑 蒋晓