

大气污染防治综合科学决策支持平台的开发及应用

邢佳¹, 王书肖^{1*}, 朱云², 丁点¹, 龙世程², 田皓中¹, JANG Carey³, 郝吉明¹

1.清华大学环境学院, 北京 100084

2.华南理工大学, 广东 广州 510006

3.美国环境保护局, 美国 北卡罗来纳州 27711

摘要: 大气污染防治和环境治理的紧迫性和复杂性需要科学有效的决策, 而以费效评估为标志的综合决策评估模型是支撑环境决策和管理的重要工具. 当前以 ABaCAS (Air Pollution Control Cost-Benefit and Attainment Assessment System, 空气污染控制成本效益与达标评估系统) 为代表的综合决策评估模型可以实现对特定减排方案的费效评估, 然而无法支持开展基于费效的达标路径优化, 以及对不同环境目标下减排策略的优化制定. 针对上述问题, 建立了大气污染防治综合科学决策支持平台. 该平台以 ABaCAS 的 4 个核心模块为基础, 建立了新的基于环境目标的反算技术 (LE-CO) 及优化集成运行模式 (ABaCAS-OE), 实现了对不同环境目标要求的减排量反算, 并对优化的减排策略下的空气质量改善效果、目标可达性、控制成本及健康收益进行快速估算. 将大气污染防治综合科学决策支持平台应用到京津冀及周边地区“2+26”城市, 反算了 2035 年达标要求下的减排情景, 以及对对应减排方案的费用与效益. 结果表明, 相较于 2015 年, 预测了 2035 年京津冀及周边地区的 PM_{2.5}、SO₂、NO_x、VOCs、NH₃ 排放量需分别减排 70%~87%、49%~85%、66%~74%、51%~66%、0~40% 才可达标, 并且该情景可以带来可观的效益, 费用-效益比达 3.7. 未来大气污染防治综合科学决策支持平台的研究将进一步面向多目标、多行业、多组分、多区域的精细化调控技术, 实现经济、能源、排放、浓度、成本、健康、生态、气候一体化的综合决策, 以全面支撑我国大气污染防治的综合科学决策.

关键词: ABaCAS; 成本效益; 控制策略; 空气质量; 达标

中图分类号: X51

文章编号: 1001-6929(2019)10-1713-07

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2019.09.07

Development and Application of the Scientific Decision Support Platform for Air Pollution Prevention and Control

XING Jia¹, WANG Shuxiao^{1*}, ZHU Yun², DING Dian¹, LONG Shicheng², TIAN Haozhong¹, JANG Carey³, HAO Jiming¹

1.School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2.South China University of Technology, Guangzhou 510006, China

3.U.S. Environmental Protection Agency, North Carolina 27711, USA

Abstract: The urgency and complexity of air pollution control and environmental governance require making policy decision scientifically and effectively. The integrated scientific assessment model system with cost-benefit assessment is an important tool to support environmental strategy and management. For example, the air pollution control cost-benefit and attainment assessment system (ABaCAS) can help policy maker assess the cost-benefit of certain control strategy, but cannot support the optimization of the control strategy for air quality attainment under different ambient air target. To address such issue, this study developed a scientific decision support platform for air pollution prevention and control in China. This platform is based on the 4 key components of ABaCAS, developed a new technology (LE-CO) that can calculate the emission reduction from air target requirement, as well as the optimization integrated assessment scheme (ABaCAS-OE), to design optimized control strategy and make quick assessment of corresponding air quality response, target attainment, control cost and health benefits from different control strategies. This study applied this newly developed platform in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding area, ‘2+26’ cities, and used it to evaluate the attainment test, costs, and benefits of emission reduction scenario in

收稿日期: 2019-07-02

修订日期: 2019-09-05

作者简介: 邢佳(1984-), 男, 河北石家庄人, 副教授, 博士, 博导, 主要从事大气数值模拟研究, xingjia@tsinghua.edu.cn.

* 责任作者, 王书肖(1974-), 女, 河北藁城人, 教授, 博士, 博导, 主要从事大气科学与污染防治领域研究, shxwang@tsinghua.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (No.2018YFC0213805); 大气重污染成因与治理攻关项目 (No.DQGG0301); 国家自然科学基金项目 (No.21625701)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2018YFC0213805); National Research Program for Key Issues in Air Pollution Control, China (No.DQGG0301); National Natural Science Foundation of China (No.21625701)

2035. The emissions of $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_x , NMVOCs and NH_3 in 2035 need to be reduced by 70%-87%, 49%-85%, 66%-74%, 51%-66% and 0-40% respectively to achieve the air quality standard. Besides, the air quality attainment scenario could also bring considerable benefits with the benefit/cost ratio of 3.7. Future study on the integrated scientific decision support platform for air pollution prevention and control will continually improve the technologies to support multi-objective, multi-sector, multi-pollutant, multi-regional fine control regulations. Future study on the platform is expected to achieve the integrated decision-making with the whole coverage of economic, energy, emission, concentration, cost, health, ecology and climate, to fully support the comprehensive scientific decision-making of air pollution prevention and control in China.

Keywords: ABaCAS; cost-benefit; control strategy; air quality; target attainment

当前我国正遭遇严重的大气污染问题,以 $PM_{2.5}$ 为代表的雾霾污染和以 O_3 为代表的光化学污染^[1-3] 在各大城市频发,而社会、经济、人口的持续高速发展,进一步给大气环境质量带来压力. 大气污染严重危害了人体健康和自然生态系统,大气环境中高浓度 O_3 会损害农作物及生态系统^[4],长期暴露于 $PM_{2.5}$ 浓度较高的环境下会对公民造成心血管死亡率的增加和肺功能的衰退^[5-7]. 此外, $PM_{2.5}$ 和 O_3 也是对全球气候具有重大影响的大气污染物. 因此,改善区域与城市大气环境、保障人民的身体健康、保护地球环境是我国推动生态文明建设中亟待解决的重要问题.

近 10 年来,我国采取了大量措施减少 SO_2 、 NO_x 和一次颗粒物等污染物的排放. 自 2013 年实施《大气污染防治行动计划》后,我国京津冀、长三角、珠三角地区的 $\rho(PM_{2.5})$ 呈显著降低的趋势,但 2018 年在我国 338 个地级及以上城市中,仍然有 64.2% 城市的 $\rho(PM_{2.5})$ 超过了 GB 3095—2012《环境空气质量标准》二级标准限值 ($35 \mu g/m^3$)^[8]. 此外,随着 $PM_{2.5}$ 得到有效控制, O_3 污染问题逐渐凸显,在部分城市(如上海市、深圳市等) $\rho(O_3)$ 的超标率甚至超过了 $\rho(PM_{2.5})$,使 O_3 成为大气污染的首要污染物. 因此,大气 $\rho(PM_{2.5})$ 和 $\rho(O_3)$ 的协同达标,确定来自各区域、各行业排放的各类污染物的协同减排比例,是当前开展大气污染协同控制决策的重大挑战.

针对重要事件我国开展过强制性短期控制的空气质量保障方案,如 2008 年北京奥运会和 2014 年亚洲太平洋经济合作组织(APEC)会议等,通过强制性政策调控大幅减少了一次污染物的排放,空气质量状况得到了明显改善^[9-12]. 然而,随着国际形势及经济发展的波动,这种不考虑成本的决策方法显然很难持续. 该研究将针对如何制定具有成本效益的政策,优化对多个污染来源的各类污染物的控制,建立了大气污染防治综合科学决策支持平台,以期支撑开展科学有效的大气污染防治工作.

1 概述

该研究所建立的大气污染防治综合科学决策支

持平台是在 ABaCAS (air pollution control cost-benefit and attainment assessment system,空气污染控制成本效益与达标评估系统)基础上开发的. ABaCAS 是在中国原环境保护部、美国环境保护局、美国能源基金会共同支持下,由清华大学、华南理工大学、田纳西大学等联合开发的一个大气污染控制费效评估及空气质量达标规划辅助决策系统. ABaCAS 原型于 2011 年首先发布,其设计重点是辅助决策分析. 经过中国和美国科学家团队 8 年的开发,ABaCAS 可提供广泛的应用,包括决策辅助和科学研究^[13].

一般来说,基于费效评估原则的大气污染控制决策其实是将大气污染控制作为一项投资,估算从中得到的收益,从而确定这项控制策略是否科学有效. 其中,需要回答的关键科学问题包括:①对于特定减排情景下的空气质量将如何变化;②该减排情景是否可以达到预设的污染物目标环境质量浓度;③不同减排情景下的控制成本;④减排措施带来污染物环境质量浓度下降的收益.

针对上述问题,ABaCAS 系统建立了 4 个核心模块,即 ICET (international cost estimate tool,成本评估系统)、RSM (response surface model,减排与空气质量快速响应系统)、SMAT (software of model attainment test,空气质量达标评估系统)、BenMAP (environmental benefits mapping and analysis program,环境效益评估系统)(见图 1). 由图 1 可见:ABaCAS 系统的 4 个模块既各自独立又互有联系. ICET 涵盖了不同行业、不同控制技术对应的成本信息,可用于评估不同减排策略下的控制成本;RSM 基于海量的空气质量模拟及统计技术建立,可对不同排放变化情景下的空气质量

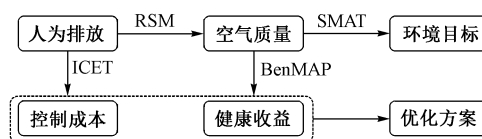


图 1 ABaCAS 的核心模块及相互关系

Fig.1 The interactions between key components of ABaCAS

进行实时估算;SMAT 融合了模型估算的污染物质量浓度变化与国控站点监测的数据,开展对减排策略是否可以达到环境目标进行评估工作;BenMAP 基于环境流行病学的浓度-响应健康影响方程,估算污染物环境质量浓度改善带来的健康影响并将其货币化得到经济收益。

通过对比投入和产出效益,得到特定减排策略的费用-效益比,从而评估了该减排策略的科学有效性。ABaCAS 系统的 4 个模块将环境目标、人为排放、空气质量、控制成本、健康收益有机联系起来,旨在综合利用区域空气质量改善获得的人体健康效益及相应的污染治理成本货币化结果,优化污染控制策略,有效降低我国区域大气污染,减少人体健康损害,使大气 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{O}_3)$ 达到 GB 3095—2012《环境空气质量标准》。

为了便于决策者实现完整的决策工作,ABaCAS 系统也在不断完善对应的辅助模块,包括 LE-CO (least-cost control strategy optimization,成本最小化的控制决策模型)、数据融合与可视化分析系统(data fusion tool)、模型可视化分析工具(Model-VAT, model-visualization and analysis tool)、大气污染防治综合决策支持平台一体化评估系统(ABaCAS-SE, streamline edition),以及 ABaCAS-OE (optimized edition,空气污染控制成本效益与达标评估优化反算系统)。

然而,我国各大城市均面临着如何制定更为科学有效的减排策略,在最佳可行及费用-效益比最优的情况下实现大气环境质量达标;而传统的 ABaCAS 模型尚未具备基于环境目标反算减排量的功能,从而无法制定费用-效益比最优的减排策略。因此,该研究针对该问题,在 ABaCAS 现有的 4 个核心模块基础上,研发了基于不同环境浓度的反算技术及优化综合决策方法,建立了新的、更有效地支持我国地方开展科学决策的大气污染防治综合科学决策支持平台。

2 研究方法

2.1 LE-CO

实现从环境浓度到减排量的反算最为关键的技术是对建立环境浓度与大气污染物排放量的显式方程,而传统 ABaCAS 中的 RSM 模型是基于统计的黑箱模式,其计算效率较低,无法实现大规模情景的筛选与优化。因此,该研究首先解决了响应曲面模型的显性解析式的拟合,即利用一组多项式函数量化空气质量对排放控制的响应[见式(1)]。

$$\Delta X = \left[\sum_{i=1}^a A_i \times (E_{P1})^i + \sum_{j=1}^{a'} A_j' \times (E_{P2})^j + \sum_{i=1}^b B_i \times (E_{P1})^{a_i^1} \times (E_{P2})^{a_i^2} \right] + C_i \times E_{PM} \quad (1)$$

式中: ΔX 为 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{O}_3)$ 对排放源变化的响应, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; E_{P1} 、 E_{P2} 为两种前体物相对基准情景的排放变化率,%;两种前体物为 NO_x 、 SO_2 、 NH_3 、 VOCs 中的任意两种; a 、 a' 为两种前体物的最高阶数; E_{PM} 为一次 PM 排放的变化率,%; A_i 、 A_j' 、 B_i 、 C_i 为多项式中对应不同污染物组合的系数; i 、 j 分别为两种前体物的非线性程度; a_i^1 、 a_i^2 为两种前体物的相关程度; b 为两种前体物的相互作用项的总数。 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{O}_3)$ 对一次 PM 排放的响应表现出线性行为,可以通过线性回归表示。

在可视化分析模块中,利用实时响应浓度地图、可视化展示曲线图及数据分析图对排放控制因子和环境浓度之间的关系进行展示和分析。由图 2 可见,左侧栏显示了 56 个控制因子,用户可以对 56 个控制因子相对基准的比例(基准为 1,全部控制为 0)进行任意调整,右侧栏展示了在用户设定的 56 个因子组合下的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 。因此,通过该模型可以实现不同排放控制因子的组合下,快速展示出 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在该减排组合下的实时响应。

在建立的多项式拟合响应曲面模型基础上,综合了多目标函数、响应关系、协同效应的污染控制决策问题,采用最优化等数学方法求解最佳控制策略,以实现政策情景的反算优化。首先基于多项式拟合的响应曲面模型建立减排-浓度变化的曲线,联合各污染物的边际成本曲线进行加权计算,采用网格寻优方法的最优化方法,将各环境目标浓度对应的减排组合基于成本最低原则进行筛选,最终实现对不同环境目标所对应的不同污染物减排方案的反算[见式(2)~(5)]。反算得到的控制策略最优组合不仅能满足空气质量达标要求,而且具有最高的成本效益。

$$A_T = \sum_{r=1}^R \sum_{p=1}^P A_p^r \quad (2)$$

$$A_p^r = f_p^r(B_p^r) \quad (3)$$

$$X_s^r = \text{rsm}_s^r(B_p^r) \quad (4)$$

$$X_s^r \leq X_s^0 \quad (5)$$

式中, A_T 为总成本, A_p^r 为污染物 p (NO_x 、 SO_2 、 NH_3 、 VOCs 和一次颗粒物)在 r 地区的成本, P 为污染物总数, R 为区域总数, f_p^r 为污染物 p 在 r 地区的成本控制率函数, B_p^r 为污染物 p 在 r 地区的减排比例, rsm_{sp}^r 为基于 RSM 的污染物 s ($\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3) 关于 B_p^r

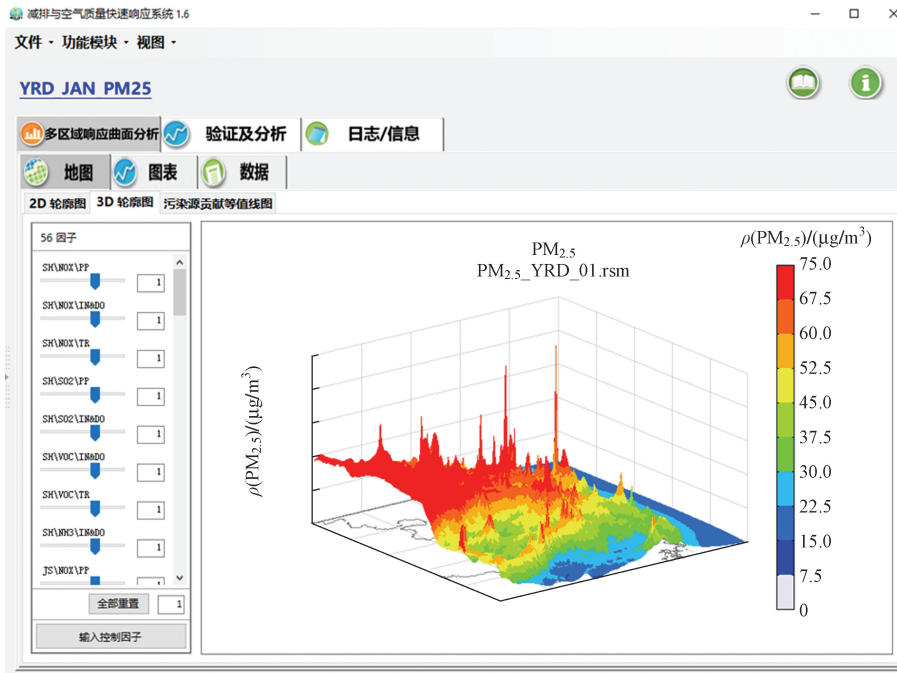


图 2 RSM 系统中的实时响应浓度

Fig.2 The real-time air quality prediction in RSM system

的函数, X_r^s 为基于 RSM 对 r 地区污染物 s ($PM_{2.5}$ 和 O_3) 浓度的估算, X_s^0 为污染物 s ($PM_{2.5}$ 和 O_3) 预期达到的空气质量目标。

LE-CO 系统功能框架如图 3 所示,其基本计算流程:①设置污染物控制环境目标[如 $\rho(PM_{2.5})$ 年均值为 $35 \mu g/m^3$]作为优化的约束条件。②通过 RSM 模型的减排-效益响应关系,估算每个控制方案下污染物浓度对减排控制的实时响应,即控制效果。③基于 ICET 提供的边际成本曲线,估算与每个控制方案相关的总控制成本,得到控制措施的组合。④从几个候选的方案中选择最优的控制方案,基于总控制成本最小的优化条件,满足达到污染物控制目标和成本最低这 2 个要求,从而确定费用-效益最优的减排方案。

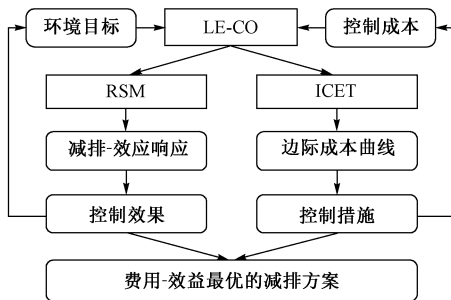


图 3 LE-CO 系统功能框架^[14]

Fig.3 The framework of LE-CO^[14]

2.2 ABA-CAS-OE (空气污染控制成本效益与达标评估优化反算系统)

该研究将新建立的 LE-CO 模块与 ABA-CAS 系统中的 4 个核心模块进行了集成,因此可以实现基于费效优化的科学决策,并为决策者提供用户友好的框架以开展应用。

ABA-CAS-OE 将通过使用主脚本运行,帮助用户获得指定达标空气质量的优化控制策略,ABA-CAS-OE 系统功能框架如图 4 所示。由图 4 可见:①用户设定了空气质量目标[如 $\rho(PM_{2.5})$ 年均值为 $35 \mu g/m^3$, $\varphi(O_3)$ 每日最大 8 h 平均值为 80×10^{-9}];②由 SMAT 结合各站点的监测值计算与排放削减率实时响应的 $\rho(PM_{2.5})$ 和 $\varphi(O_3)$;③将不同污染物和区域的削减率输入控制成本优化器(LE-CO、ICET 和 RSM 之间的迭代计算),找出以最小成本满足环境目标的优化控

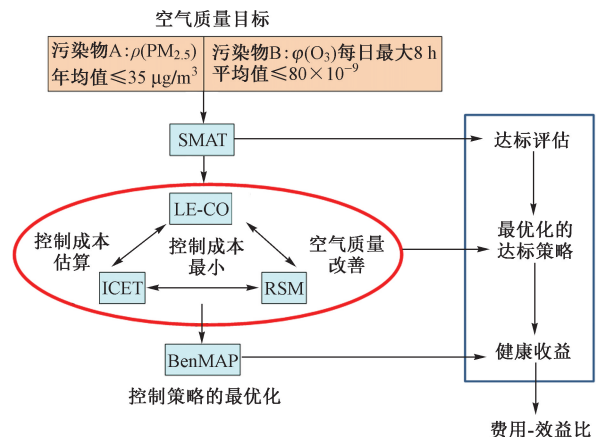


图 4 ABA-CAS-OE 系统功能框架

Fig.4 The framework of ABA-CAS-OE

制成本策略;④将优化控制成本策略输入 BenMAP,以估算空气质量变化带来的健康和经济效益;⑤系统将输出与这些优化排放控制策略相对应的费用-效益比。

3 应用案例

京津冀及周边地区的颗粒物污染一直较为严峻。为打赢蓝天保卫战,我国对京津冀地区大气污染传输通道城市提出了更高的减排要求。京津冀地区大气污染传输通道城市(简称“2+26”城市”)包括北京市,天津市,河北省石家庄市、唐山市、廊坊市、保定市、沧州市、衡水市、邢台市、邯郸市,山西省太原市、阳泉市、长治市、晋城市,山东省济南市、淄博市、济宁市、德州市、聊城市、滨州市、菏泽市,河南省郑州市、开封市、安阳市、鹤壁市、新乡市、焦作市、濮阳市。因此,为实现各城市空气质量在 2035 年达到 GB 3095—2012《环境空气质量标准》二级标准,该研究基于研发的反算技术与优化模型方法,建立了“2+26”城市大气污染防治综合科学决策支持平台,以 $PM_{2.5}$ 达标为约束条件,提出费用效益优化的协同控制途径。

3.1 基于达标浓度的减排需求

为实现 2035 年各城市的 $\rho(PM_{2.5})$ 达标,基于建立的 LE-CO 模型反算了各城市各污染物的减排需求。在此基础上,预测了至 2035 年由于增长带来的大气污染排放的变化,设计了考虑能源结构调整和能源端总量控制相关的空气污染控制政策,以及更为严格的末端政策要求达标情景^[14]。

图 5 为基于 LE-CO 模型反算的 2035 年达标情景下北京市、天津市、河北省、山西省、山东省、河南省各污染物减排比例。由图 5 可见:2035 年京津冀及周边地区的 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_x 、 $VOCs$ 、 NH_3 排放量相对于 2015 年分别减排 70%~87%、49%~85%、66%~74%、51%~66%、0~40%。各省(直辖市)减排比例有所差异,山东省和河南省的 $PM_{2.5}$ 减排效果略低于其他几个地区;北京市由于现有 SO_2 控制水平较为严格,其未来 SO_2 减排潜力明显低于其他省(直辖市)。整体

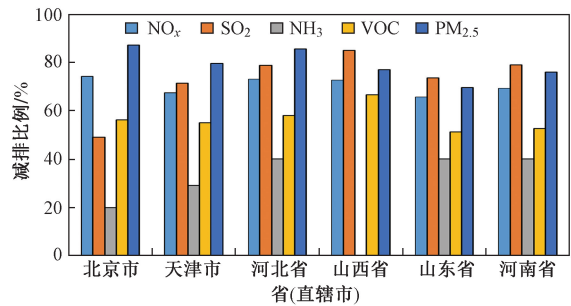


图 5 2035 年达标情景下北京市、天津市、河北省、山西省、山东省、河南省各污染物减排比例

Fig.5 Emission reduction ratio of Beijing, Tianjin City, Hebei Province, Shanxi Province, Shandong Province, Henan Province in 2035 scenario

上 $VOCs$ 和 NH_3 减排比例明显低于其他污染物。

3.2 达标评估检验

为了进一步验证反算模型给出的减排量及减排情景是否可以满足达标的需求,该研究进一步基于 RSM 模型预测了 2035 年情景下各城市污染物质量浓度的削减比例,并利用 SMAT 模型基于 2015 年各城市 $\rho(PM_{2.5})$ 年均值对模拟结果进行修正。图 6 为 2035 年在达标情景下“2+26”城市 $\rho(PM_{2.5})$ 年均值预测情况。由图 6 可见,相比于 2015 年,2035 年各城市 $\rho(PM_{2.5})$ 年均值降幅在 61%~76%之间,各城市均能达标($35 \mu g/m^3$),其中京津冀地区改善显著。这也印证了该研究建立的 LE-CO 反算技术的可靠性。

3.3 控制成本估算

基于 ICET 模型,对反算得到的达标情景控制成本进行了估算。首先,对 ICET 模型中京津冀地区的边际成本曲线进行了更新^[15],分别计算了北京市、天津市、河北省、山西省、山东省及河南省的大气污染物(SO_2 、 NO_x 、 $PM_{2.5}$ 、 $VOCs$ 及 NH_3)减排成本曲线。总体来说, NO_x 、 $VOCs$ 和 NH_3 的减排成本远高于 SO_2 和一次 $PM_{2.5}$ 。相较于北京市、天津市和山西省,河北省、山东省及河南省的减排成本较高,主要原因是这几个地区有较高的大气污染物排放量。由图 7 可见:大气

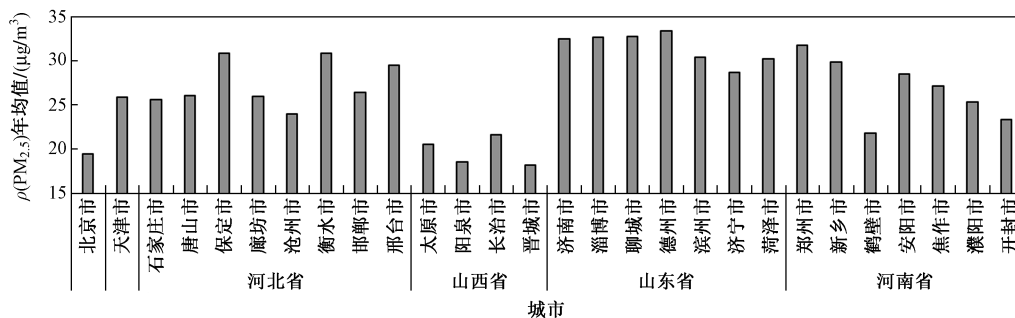


图 6 2035 年在达标情景下“2+26”城市 $\rho(PM_{2.5})$ 年均值预测情况

Fig.6 Predicted annual $PM_{2.5}$ of ‘2+26’ cities in 2035 scenario

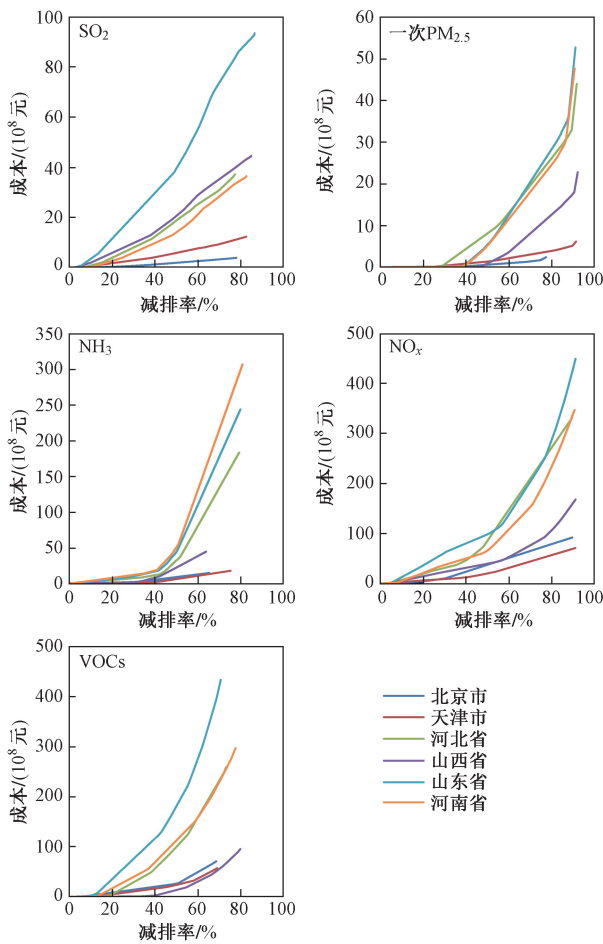


图7 北京市、天津市、河北省、山西省、山东省、河南省各污染物减排的边际成本曲线

Fig.7 Marginal abatement cost curves of five pollutants in Beijing City, Tianjin City, Hebei Province, Shanxi Province, Shandong Province, Henan Province

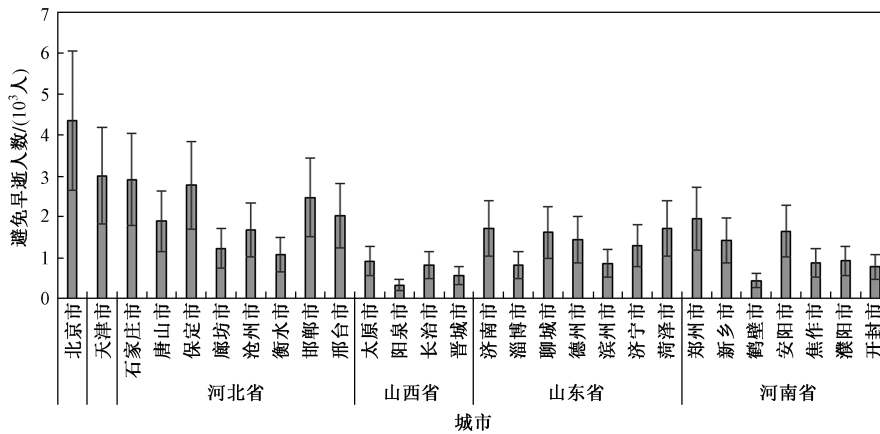
污染物的减排率及其减排成本总体呈指数型增长趋势. 对于SO₂, 山东省、山西省及河北省表现出较高的减排潜力和减排成本; 对于一次PM_{2.5}, 山东省、河南

省及河北省表现出较高的减排潜力和减排成本; 对于NO_x和VOCs, 山东省、河北省及河南省减排成本较高; 对于NH₃, 河南省的减排潜力和减排成本最高.

基于该减排-成本曲线, 计算了2035年达标情景下京津冀及周边地区PM_{2.5}、SO₂、NO_x、VOCs的减排成本分别为332×10⁸、631×10⁸、2 080×10⁸、3 470×10⁸元, 共计6 513×10⁸元.

3.4 健康效益评估

利用BenMAP模型, 对该达标情景下的健康影响进行了评估. 采用的暴露-反应函数关系来自全球疾病负担研究中常用的综合暴露响应模型(integrated exposure-response model, IER). 图8为2035年在达标情景下“2+26”城市避免早逝的人数. 由图8可见, 2035年各省(直辖市)避免早逝人数预计在340~4 346人之间, 共计约4.4×10⁴人/a, 相比于基准年(2015年)将减少23%, 其中, 北京市由于人口较多, 所获得的效益最大, 避免早逝人数预计为4.3×10³人/a (95%置信区间, 2.6~6.0). Maji等^[16]研究表明, 京津冀地区假设2020年ρ(PM_{2.5})减至35 μg/m³, 则预计早逝人数相比于2015年将减少25.4%, 由空气质量改善带来的健康效益占比与该研究相当. 进一步采用统计生命价值进行货币化, 结果显示, 相比于2015年, 2035年ρ(PM_{2.5})的削减将带来2 290×10⁸元/a (95%置信区间, 该值范围为1 398×10⁸~3 182×10⁸元/a)的健康效益. 假设疾病负担在2015—2035年以线性方式递减, 计算20 a内可能获得的健康效益共约24 045×10⁸元. 通过与该情景控制成本(6 513×10⁸元)比较, 效益与成本比约为3.7. 结果说明在该区域开展大气污染控制及空气质量达标工作可以实现正向的收益, 即费用-效益比达3.7.



注: 误差线显示的为95%置信区间.

图8 2035年在达标情景下“2+26”城市避免早逝的人数

Fig.8 Avoided deaths attribute to PM_{2.5} reduction in 2035

4 结论与展望

a) 该研究摒弃了传统 ABaCAS 系统中对于排放浓度响应模型的统计拟合黑箱方式,而是采用响应曲面模型的显性解析式拟合,从而实现用一组多项式函数量化空气质量对排放控制的响应关系,快速提高了运算效率,为实现从环境浓度反算减排量提供了基础。

b) 该研究建立了通过环境浓度反算减排需求的 LE-CO 模型,实现反算选择满足特定空气质量目标下具有最高成本效益的控制策略最优组合,并且进一步建立了为特定空气质量目标制定的优化(最低成本)控制策略,以进行成本-效益控制策略分析(ABaCAS-OE)的运行系统,可有效支持地方空气质量达标规划的工作需求。

c) 该研究将建立的中国大气污染防治综合科学决策支持平台成功应用到了京津冀及周边地区“2+26”城市,反算了达标情景,预测了 2035 年京津冀及周边地区的 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_x 、VOCs、 NH_3 排放量相对于 2015 年需分别减排 70%~87%、49%~85%、66%~74%、51%~66%、0%~40% 才可以达标,并且该情景可以带来可观的效益,费用-效益比达 3.7。

d) 该研究建立的大气污染防治综合科学决策支持平台可以在未来进一步改进:①平台的不确定性很大程度来自输入的参数,如成本和健康模型的参数,目前平台中大部分参数还是依照欧美研究的结果,未来需要对基础数据进行进一步的本地化更新。②该平台需要进一步扩展对多污染物的解析,随着颗粒物污染的有效控制, O_3 问题日益突出,未来在环境目标的决策方法、多行业的分配方式、多组分(如 VOCs 组分)的精细调控、多区域的协同调控等方面还有较大的改进空间。此外,ABaCAS 虽然是针对中长期规划,但是社会经济增长带来的预期压力并没有考虑在模型中,将能源系统的综合评估模型[如美国西北太平洋国家实验室开发的全球变化评估模型(GCAM, Global Change Assessment Model)]与 ABaCAS 耦合,可以将未来活动水平的增量也纳入到评价系统中,同时考察能源政策的影响及气候变化的协同效益,从而得到更为全面的从经济、能源、排放、浓度、成本、健康、生态、气候的一体化综合决策。

e) 中国政府计划在未来 20 年内实施旨在降低大气环境中 O_3 和 $PM_{2.5}$ 浓度的严格控制措施。要实现大气环境的明显改善,需要明智政策和良好工具的指导,预计大气污染防治综合科学决策支持平台将在支撑制定空气质量目标和大气污染控制方案方面发挥重要作用。

参考文献(References):

- [1] MA Jianzhong, CHEN Yue, WANG Wei, *et al.* Strong air pollution causes widespread haze-clouds over China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010. doi: <https://doi.org/10.1029/2009JD013065>.
- [2] SU Shenshen, LI Bengang, CUI Siyu, *et al.* Sulfur dioxide emissions from combustion in China: from 1990 to 2007 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(19): 8403-8410.
- [3] ZENG Yingying, CAO Yuanfei, QIAO Xue, *et al.* Air pollution reduction in China: recent success but great challenge for the future [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 663: 329-337.
- [4] JURG F, MARIA V M, GINA M, *et al.* Current and future ozone risks to global terrestrial biodiversity and ecosystem processes [J]. *Ecology and Evolution*, 2016, 6(24): 8785-8799.
- [5] BURNETT R T, POPE-III C A, EZZATI M, *et al.* An integrated risk function for estimating the global burden of disease attributable to ambient fine particulate matter exposure [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2014, 122(4): 397-403.
- [6] CROUSE D L, PETERS P A, VAN D A, *et al.* Risk of nonaccidental and cardiovascular mortality in relation to long-term exposure to low concentrations of fine particulate matter; a Canadian national-level cohort study [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2012, 120(5): 708-714.
- [7] POPE C A, DOCKERY D W. Air pollution and life expectancy in China and beyond [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(32): 12861-12862.
- [8] 生态环境部. 2018 中国生态环境状况公报 [R]. 北京: 生态环境部, 2019; 7-15.
- [9] WANG Yuxuan, HAO Jiming, MCELROY M B, *et al.* Ozone air quality during the 2008 Beijing Olympics: effectiveness of emission restrictions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(14): 5237-5251.
- [10] ZHANG Xiaoye, WANG Yaqiang, LIN Weili, *et al.* Changes of atmospheric composition and optical properties over Beijing: 2008 Olympic monitoring campaign [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(11): 1633-1652.
- [11] XU Wen, LIU Xuejun, LIU Lei, *et al.* Impact of emission controls on air quality in Beijing during APEC 2014: implications from water-soluble ions and carbonaceous aerosol in $PM_{2.5}$ and their precursors [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 210: 241-252.
- [12] LI Kun, LI Junling, WANG Weigang, *et al.* Evaluating the effectiveness of joint emission control policies on the reduction of ambient VOCs: implications from observation during the 2014 APEC summit in suburban Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 164: 117-127.
- [13] XING Jia, WANG Shuxiao, JANG C, *et al.* ABaCAS: an overview of the air pollution control cost-benefit and attainment assessment system and its application in China [EB/OL]. Pittsburgh: The Magazine for Environmental Managers, Air & Waste Management Association, 2017 [2019-09-20]. <http://www.awma.org/emapr17>.
- [14] 王彤. 基于气候变化和空气质量约束的 CO_2 和大气污染物协同减排研究 [D]. 北京: 清华大学, 2019.
- [15] XING Jia, ZHANG Fenfen, ZHOU Yang, *et al.* Least-cost control strategy optimization for air quality attainment of Beijing-Tianjin-Hebei Region in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 245: 95-104.
- [16] MAJI K J, DIKSHIT A K, ARORA M, *et al.* Estimating premature mortality attributable to $PM_{2.5}$ exposure and benefit of air pollution control policies in china for 2020 [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 683-693.