

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0762

臭氧污染动态源贡献分析方法及应用初探

李敏辉¹, 朱云^{1,*}, Carey Jang², 吴志伟³, 王书肖⁴, 谢阳红³, 梁俊明³, 朱振华¹, 叶代启¹, 余斌⁵

1. 华南理工大学环境与能源学院, 广东省大气环境与污染控制重点实验室, 广州 510006

2. USEPA/Office of Air Quality Planning & Standards, RTP, NC27711, USA

3. 顺德区环境运输和城市管理局, 佛山市顺德区 528300

4. 清华大学环境学院, 北京 100084

5. 广州市环境监测中心站, 广州 510030

摘要: 论文创新提出了基于 RSM/CMAQ 臭氧污染动态源贡献分析方法, 并以佛山市顺德区 2014 年 10 月为例, 分析了不同区域的人为可控源 NO_x 和 VOCs 减排情景下 (10%、70% 和 100%) 对本地 O₃ 浓度变化的量化贡献。研究结果表明顺德区 O₃ 的人为可控比例约 43%, 且受区域排放影响非常明显, 主导上风向广州排放源总贡献 (14%) 超过顺德本地贡献 (7%)。VOCs 的减排可有效削减顺德区 O₃ 浓度, 当减排力度较小时 (<12%), 若仅控制区域 NO_x 排放将导致顺德区 O₃ 浓度上升, 随着减排力度的加大, 区域 NO_x 的削减贡献会反超 VOCs。RSM/CMAQ 动态源贡献分析方法可为空气质量管理提供科学决策依据。

关键词: 臭氧; 曲面响应模型; 空气质量模型; 动态源贡献分析; 空气质量管理

The Methodology and Case Study for Dynamic Source Contribution Analysis of Ozone

LI Minhui¹, ZHU Yun^{1,*}, Care Jang², WU Zhiwei³, WANG Shuxiao⁴, XIE Yanghong³, LIANG Junming³, ZHU Zhenhua¹, YE Daiqi¹, YU bin⁵

1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Atmospheric Environment and Pollution Control, College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006

基金项目: 空气质量管理费效及达标规划评估技术及示范研究(2014A050503019); 顺德区大气复合污染机理研究及质量达标规划编制项目(x2hjD8143160); 工业点源排放大气汞沉降外场观测及分布特征研究(2014J4100089); 珠三角典型工业点源汞排放沉降数值模拟及观测(x2hjB2150020)

Supported by Quality Management Cost Benefit and Attainment Test Technology Development and Demonstration (No. 2014A050503019). The Research of Shunde Complex Air Pollution Mechanism and Air Quality Attainment Plan Compilation (No. x2hjD8143160). The Field Observation and Characteristic of Industrial Point-Source Mercury Emission, Deposition and Distribution (No. 2014J4100089), and the Pearl River Delta Typical Industrial Atmospheric Hg Emission, Deposition Simulation and Observation (No. x2hjB2150020)

作者简介: 李敏辉(1990-), 男, 研究生, Email: l[minhui@mail.scut.edu.cn]; *通讯作者(责任作者): 朱云(1972-), 男, 博士, 副教授, Email: zhuyun@scut.edu.cn

Biography: LI Minhui(1990-), male, post graduate student, Email: [l\[minhui@mail.scut.edu.cn](mailto:l[minhui@mail.scut.edu.cn)]; *Corresponding author: ZHU Yun, male, PhD, associate professor, Email: zhuyun@scut.edu.cn

2. USEPA/Office of Air Quality Planning & Standards, RTP, NC27711, USA
3. Environment & Transportation and City Authority of Shunde District, Shunde District of Foshan 528300
4. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084
5. Guangzhou Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510030

Abstract: This paper describes an innovated dynamic source contribution analysis method of ozone based on Response Surface Model (RSM). The case of Shunde District of Foshan City in Guangdong, China in October 2014 was used to analyze the contributions of pollutant emissions to ambient O₃ concentrations at different emission control scenarios of 10%, 70%, and 100%, respectively, of NO_x and VOCs reductions in multiple regions. The results showed that the controllable proportion of anthropogenic O₃ in Shunde was about 43%, and it was dominated by regional transported pollutants. Guangzhou, as the main upwind city in October 2014, contributed a total of 14% via regional transport, which is larger than the local contribution of Shunde (7%). The emission control of VOCs could reduce O₃ concentration of Shunde effectively. The O₃ concentration could increase when the NO_x emission control is less than 12% without VOCs emission control. However, the O₃ concentration would decrease with increased the NO_x emission control strength and VOCs emission control altogether. The contribution of NO_x control could even larger than that of VOCs control under the higher emissions control strength. The dynamic source contribution analysis based on RSM can provide an effective and scientific support for air quality management of ozone.

Keywords: ozone; response surface model; air quality model; dynamic source contribution analysis; air quality management

1 引言 (Introduction)

随着社会的高速发展，我国京津冀(XU *et al.*, 2011)、长三角(DONG *et al.*, 2014)、珠三角(OU *et al.*, 2015)，三大经济最发达地区的空气污染问题也愈加突出。近几年来，珠三角PM_{2.5}污染问题得到缓解，但臭氧污染凸显，其核心区域的东莞、顺德等城市臭氧年均浓度超过160ug/m³。臭氧(O₃)污染特指对流层的O₃浓度超过限值将对人与自然环境造成直接或间接的损害；其主要是由氮氧化物(NO_x)、挥发性有机物(VOCs)，在一定的光、温条件下，发生光化学反应生成(ITO *et al.*, 2009)。臭氧与其前体物间具有高度的非线性关系(COHAN *et al.*, 2005)，因此在制定O₃污染控制措施前，需要对目标地区作动态源贡献分析，尽可能避免前体物减排但O₃浓度反而增加的情况(XING *et al.*, 2011)。动态源贡献分析是指，解析不同来源的前体物因子(如：NO_x、VOCs)在不同的控制条件下对目标污染物(如：O₃)浓度变化的贡献。

截至目前，分析前体物对O₃浓度贡献的方法主要有三种。一是基于观测数据的研究方法，利用长时

段、大量的站点观测数据来评估 NO_x, VOCs 对 O₃生成的影响(WANG *et al.*, 2015; YANG *et al.*, 2005)。优点是直接由监测数据推导, 可信度较高; 缺点是对监测数据的完整性、可靠性要求高, 尤其是 VOCs 数据难以准确、大批量在线测量, 而且独立站点资料难以代表城市整体水平。二是指示剂示踪法, 即通过示踪物种的比值范围如 H₂O₂/HNO₃, H₂O₂/NO₂ 等来判断 O₃ 前体物的削减对 O₃ 变化的大体贡献趋势(XIE *et al.*, 2014; LI *et al.*, 2011), 但该方法仅能定性分析, 难以量化前体物贡献。第三种方法是通过空气质量模型来反演前体物排放量与 O₃ 浓度间的非线性变化关系, 从传统的强力法(Brute-force Method, BFM), 发展到去耦法(Decoupled Direct Method, DDM)、高阶去耦法(High-Order Decoupled Direct Method, HDDM); 模型法已被广泛应用到 O₃ 污染机理研究中(ASHOK *et al.*, 2013; ITAHASHI *et al.*, 2013; XING *et al.*, 2011; COHAN, *et al.*, 2005)。其主要问题是用户使用的专业化程度要求高、难以动态分析源贡献。本文提出的动态源贡献分析方法是在第三代多区域空气质量模型(Community Multiscale Air Quality Model, CMAQ)模拟结果的基础上进行二次建模的曲面响应法(Response Surface Model, RSM), 简称 RSM/CMAQ 法, 属于模型方法工具化的新应用。文章阐述了 RSM/CMAQ 动态源贡献分析的构建方法, 并以佛山市顺德区为典型案例分析了不同区域的 NO_x 和 VOCs 排放对本地 O₃ 浓度变化的量化贡献。

2 研究方法 (Methodology)

2.1 典型区域及模拟时段

作为广东省唯一的直辖区——顺德, 位于珠三角核心, 近年来污染控制力度较大, 成效明显; 但受 O₃ 污染拖累, 顺德区在全省空气质量排名中靠后, 且 2013 年臭氧浓度最高, 位列倒数第一。经过强化本地的 VOCs 减排措施后, 2014 年顺德区 O₃ 浓度有所下降, 但仍位列倒数第二。如图 1 所示, 2014 年顺德区的臭氧最大 8 小时值月均值从 5 月开始明显上升, 一直维持到 10 月, 之后随着气温和日照强度的下降而显著降低。6 至 10 月是顺德区 O₃ 的高值时段, 均超过了国家标准 160ug/m³; 7 月和 10 月是全年两个峰值月份, O₃ 浓度超过 200ug/m³。这其中, 10 月气候相对干燥、少雨, 大多数时间为微风、静风等不利污染物扩散的天气, 加之仍然较高的气温(21°C-31°C), 是珠三角 O₃ 污染的典型时段。因此, 论文以 2014 年 10 月为基准情景, 采用 RSM/CMAQ 方法分析不同区域的 NO_x 和 VOCs 排放对顺德 O₃ 浓度变化的动态贡献。

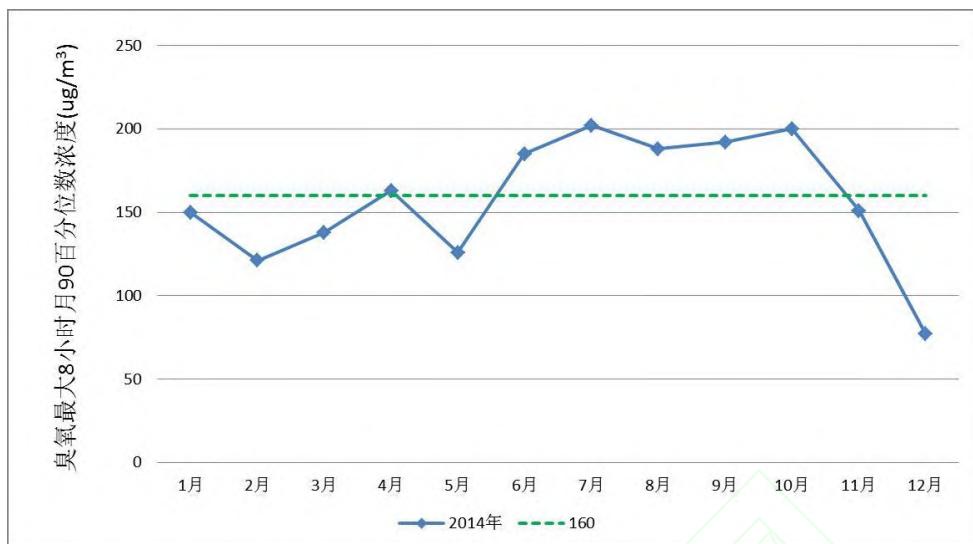


图 1 2014 年顺德最大 8 小时月 90 百分位臭氧浓度

Fig. 1 Ozone monthly 90th centile maximum 8 hours concentration of Shunde in 2014

2.2 WRF-CMAQ 模型体系

(1) WRF-CMAQ设置

气象模式使用中尺度气象预报模式 (The Weather Research and Forecasting Model, WRF) v3.4.1。驱动数据使用美国国家环境预报中心 (NCEP) 提供的逐6小时的全球气象卫星数据，并使用对应时段的探空观测数据和地面站观测数据同化。气象模式区域覆盖CMAQ网格，采用兰伯特投影，中心经纬度为112° E、30° N，两条真纬线为25° N、40° N。

空气质量模式CMAQv4.7.1采用三重嵌套，网格分辨率从外至内分别是27km×27km,9km×9km,3km×3km，外层的模拟结果作为内层的边界条件输入，提前7天开始模拟作为spin-up。模型垂直分层为20层，本次研究取第一层数据，其平均中心高度为18m，气相化学机制采用CB-05。鉴于O₃模型值的最大8小时值的月均值比第90百分位值更能减小模型偶然误差以及体现整月变化趋势，数据取垂直层第一层的O₃浓度小时值，并后处理为最大8小时月均值用于RSM建模。

(2) 模拟区域

研究区域为图 2所示的第三层嵌套区域，范围约从112.267° E——115.625° E,21.705° N——24.674° N，共148行×112列。此区域包括珠三角各城市以及周边地区。为分析目标区域排放传输的相互影响，人为划分七大区域：顺德区A、佛山B、广州C、中山D、江门E、东莞和深圳合并为F、其他陆地区域合并为G。

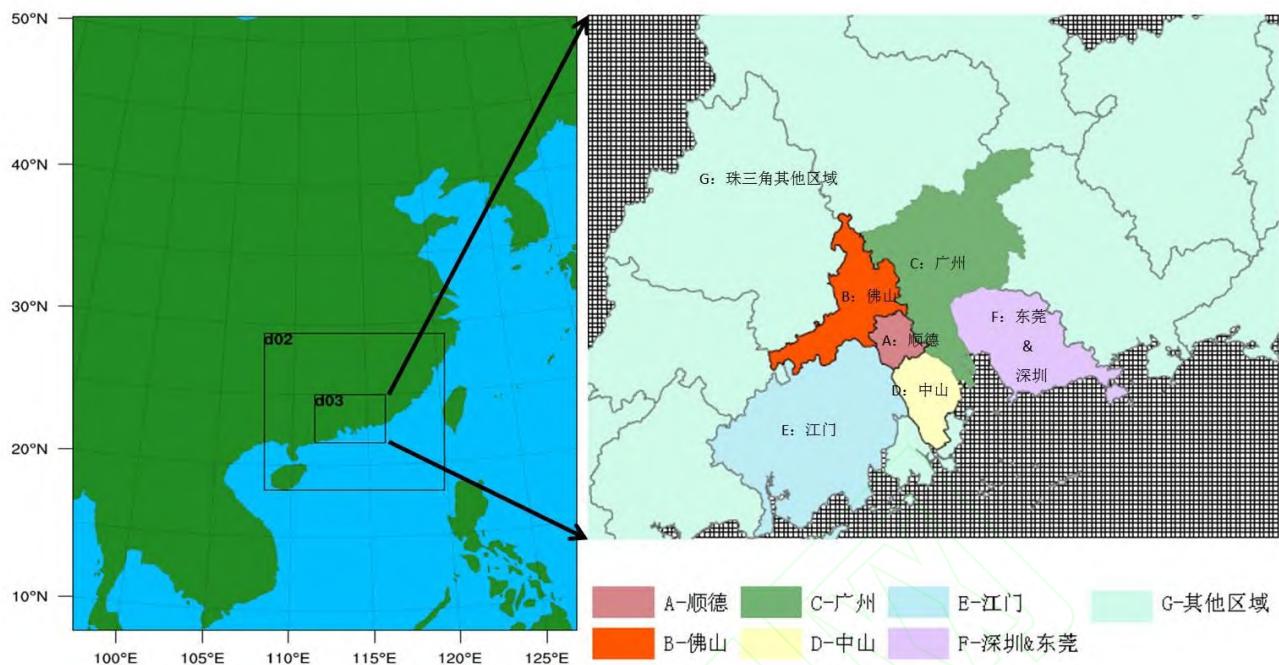


图 2 模型模拟区域及目标区域划分

Fig. 2 Simulation domain and target area setting

(3) 排放清单

第一、第二层使用欧盟委员会发起的全球清单计划EDGARv4.2 (The Emissions Database for Global Atmospheric Research)的2008年 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 清单(JANSSENS-MAENHOUT *et al.*, 2013), 第三层区域使用本项目研究组团队编制的2014年 $3 \times 3\text{km}$ 的广东省大气污染源排放清单。

2.3 基于 RSM/CMAQ 的动态源贡献实验设计

RSM/CMAQ是一种基于CMAQ模拟结果的二次建模方法,其建立了排放控制与环境质量浓度的实时高维曲面响应关系。(邢佳, 2011; ZHAO *et al.*, 2014; ZHU *et al.*, 2015)。论文使用项目研究团队研发的RSM-VAT软件工具 (<http://www.abacas-dss.com>) 来完成响应曲面建模并提供可视化辅助决策支持(劳苑雯等, 2012)。

论文分别建立了旨在分析多区域排放源相互影响的Multi-region RSM, 以及本地与周边多类源相互影响的Region&Local RSM。Multi-region RSM设立的前体物控制因子共有A至G七大区域以及NO_x、VOCs两种前体物的组合共 $7 \times 2 = 14$ 个, 并使用拉丁超立方采样法 (LHS, Latin Hypercube Sample) 建立200个随机控制情景组成的实验矩阵, 其中取180个建模, 剩余20个用作验证RSM可靠性。Region&Local设立的2大区域为顺德本地以及周边所有区域, 整体模拟范围与Multi-region相同, NO_x排放分为工业源、交通源&面源、火电源, VOCs排放分为工业源、交通源、面源, 共6类源的组合, 总控制因子数为 $2 \times 6 = 12$ 个; LHS建立的实验矩阵共140个随机情景, 取前120个建模, 剩余20用以验证可靠性。

使用RSM-VAT工具(ZHU, *et al.*, 2015), 取模型域内目标区域NO_x、VOCs控制因子分别为横纵坐标, 以

顺德区为受体，绘制O₃浓度响应等值曲线（图 3）。参照臭氧峰值率（Peak Ratio, PR）评定法(邢佳, 2011)，图 3红色箭头落在NO_x基准线的左侧，可判断顺德区臭氧受VOCs控制。即当保持VOCs排放率为1不变时，不断减少区域整体NO_x的排放率，O₃的浓度会经历先上升然后下降的过程；而保持NO_x排放率为1，不断减少区域VOCs的排放率，O₃的浓度会一直下降。图 3红色箭头所指PR值约为88%，表明在VOCs排放不变的前提下，区域NO_x整体削减超过12%后才能有效降低大气O₃浓度。为此，论文分别在PR值两侧，取前体物控制因子的10%以及70%的减排比例作为区域整体减排对顺德区O₃浓度动态贡献分析的典型情景，同时取100%的全削减情景近似为顺德的臭氧污染来源解析。

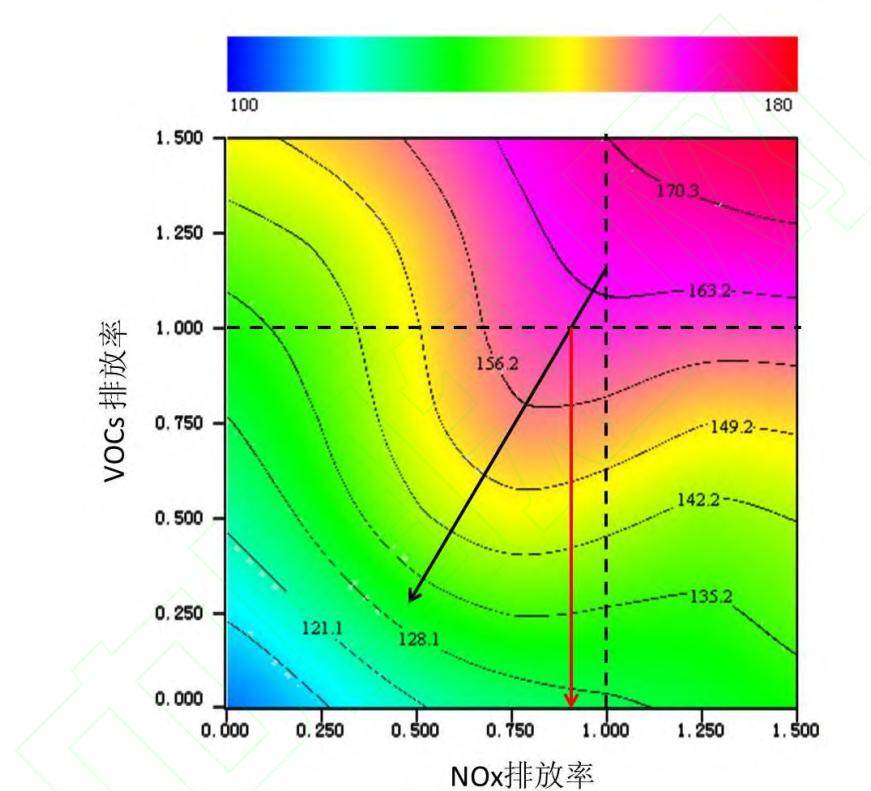


图 3 顺德区 O₃ 浓度响应等值曲线 (ug/m³)
Fig. 3 Isopleths of O₃ concentration response curve in Shunde (ug/m³)

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 模拟结果校验

图 4、图 5为基准情景（2014年排放）模拟值与实际观测值的比较。图 4的绝大部分点落在1:1标准线的±50%线之内，模拟值的准确度已经满足要求(LIN *et al.*, 2007)；但落入标准线下侧点比上侧的稍多，说明O₃最大8小时值模拟结果存在轻微低估现象。从图 5观测数据与模型数据的O₃时序值比较可以看出，二者变化趋势基本吻合，相关性系数R可达0.84；模拟值在部分O₃高值时序中低于观测值，且夜间时段模拟值降低幅度也相对较大，造成了O₃模拟值的整体低估，这也是CMAQ的化学机制不断改进的重点(CHO *et al.*,

2012·APPEL *et al.*, 2012)。

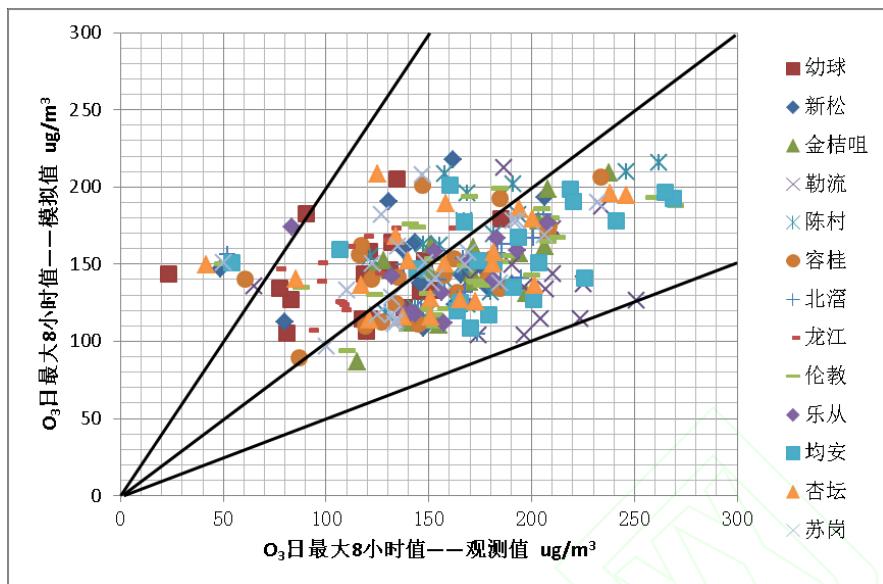


图 4 顺德区 13 个站点观测与模型数据的 O_3 日最大 8 小时值比较

Fig. 4 Ozone daily maximum 8 hours value comparison between monitoring and modeling data of 13 sites in Shunde

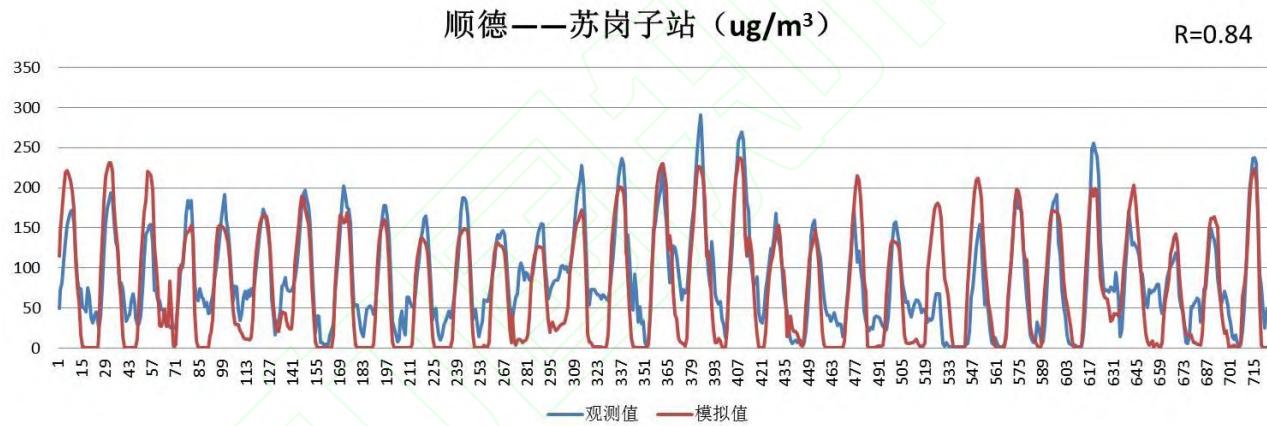


图 5 顺德区苏岗站点观测数据与模拟结果的时序比较

Fig. 5 Hourly variation comparison between monitoring and modeling data at Sugang site

下图 6和表 1是RSM/CMAQ的两组建模结果的验证。图 6中横坐标是Multi-region和Region&Local两组曲面的20组验证情景的CMAQ模拟值，而纵坐标则是对应的RSM预测值。两组响应曲面的预测结果均与CMAQ模拟结果呈现高度相关性，相关性系数R高达0.99以上，每组验证情景的数据布点较为均匀地落在线性预测线的两侧，没有单向的高估或低估。而从表 1的响应曲面评价指标里可以看出，Multi-region曲面的标准平均偏差范围从-0.53%至0.47%，Region&Local曲面则从-0.78%至2.61%。图 6和表 1中模型效果评价指标说明RSM/CMAQ所建立的两组响应曲面能很好的反映CMAQ模拟结果，可用来进一步挖掘控制因子与目标污染物空气质量浓度的高维非线性关系(ZHAO, et al., 2014; ZHU, et al., 2015)。

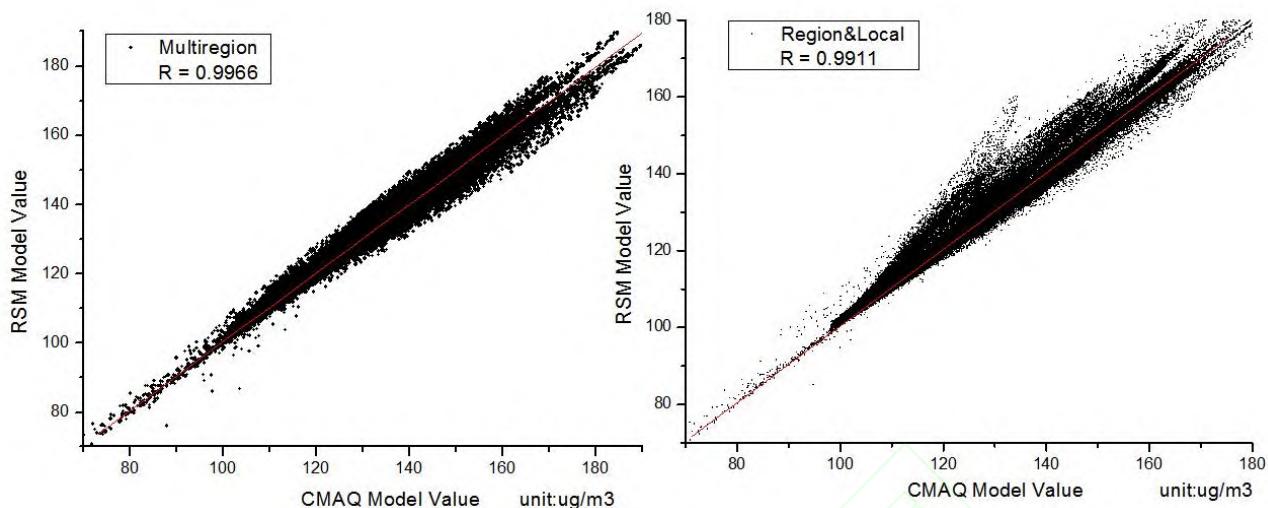


图 6 RSM/CMAQ 建模效果验证

Fig. 6 Verification of RSM/CMAQ modeling results

表 1 RSM/CMAQ 建模结果评价

Table 1 The evaluation of RSM/CMAQ modeling results

评估指标	平均值Mean		最小值Minimum		最大值Maximum	
	Multi-region	Region&Local	Multi-region	Region&Local	Multi-region	Region&Local
平均偏差 Mean Bias	0.02	0.15	-0.32	-0.44	0.28	1.40
平均误差 Mean Error	0.26	0.44	0.16	0.05	0.43	1.41
平均标准偏差 Mean Normalized Bias (%)	0.05	0.28	-0.47	-0.72	0.46	2.54
平均标准误差 Mean Normalized Error (%)	0.43	0.73	0.25	0.08	0.70	2.56
平均相对偏差 Mean Fractional Bias (%)	0.05	0.26	-0.48	-0.72	0.45	2.46
平均相对误差 Mean Fractional Error (%)	0.43	0.72	0.25	0.08	0.70	2.48
标准平均偏差 Normalized Mean Bias (%)	0.04	0.28	-0.53	-0.78	0.47	2.61
标准平均误差 Normalized Mean Error (%)	0.45	0.77	0.27	0.08	0.73	2.63

3.2 典型区域臭氧动态源贡献分析

大气运动是影响污染物传输的主要原因，顺德地处珠三角中心地带，自身面积小，区域污染物传输对顺德的影响更为显著。图 7 为 2014 年 10 月份顺德区苏岗站点的风向频率统计图，径向坐标为风向频率，半径间距刻度为 3%；角坐标为风向，角度间隔为 22.5° ；角坐标上标签格式为：风向频率/平均风速。该时段的风基本来自顺德北偏东方向，其中约 19.9% 落在正北偏东方向，约 8.2% 落在正东方向，约 10.8% 在东

偏北方向，约 11.4% 在东北方向；几大主导上风向的临近城市主要为广州、深圳、东莞，尤以来自广州市番禺地区的频率最高。顺德区 10 月份的平均风速不足 1.5m/s，属于软风，不利于污染物的扩散、沉降。

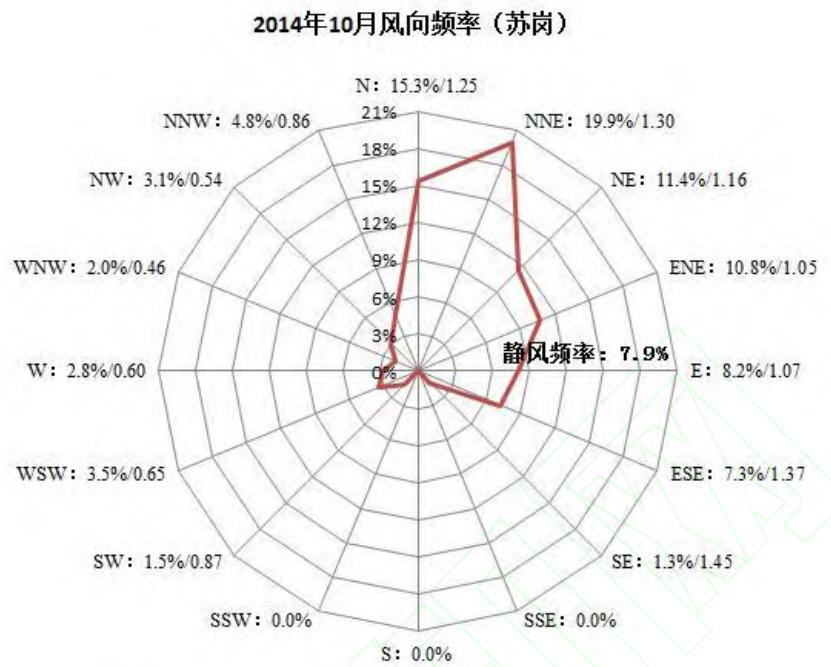


图 7 苏岗空气质量站点风玫瑰图

Fig. 7 The wind rose of the air quality monitor site at Sugang

把人为可控 NO_x 和 VOCs 排放全部关闭（100% 全削减）情景输入到所建立的两组 RSM (Multi-region 以及 Region&Local)，逐一解析得到不同区域排放的前体物对顺德区 O₃ 全浓度贡献（图 8）。结果表明，珠三角所有人为源排放对顺德区 O₃ 的贡献约占 43%；其中，顺德本地约 7%、佛山约 2%、广州约 14%、中山约 2%、江门约 2%、深圳&东莞共约占 10%、其他区域约占 6%。2014 年 10 月对顺德区 O₃ 浓度贡献最大的地区为广州、深圳&东莞，且区域排放传输影响远大于本地排放。进一步分析，不同区域(Multi-region) 前体物贡献条形统计图可得，区域 NO_x、VOCs 排放关闭可降低顺德的 O₃ 最大 8 小时值的月均值分别约为 37.83ug/m³、33.36ug/m³。经由 Region&Local 建立的 RSM 得到顺德本地各行业的排放贡献（图 8），本地的交通源、工业源、面源 VOCs 削减贡献约占 9.38ug/m³；虽然本地的交通源&面源 NO_x 为负贡献 (-1.37ug/m³，即减排将增加本地 O₃ 浓度)，但火电和工业 NO_x 减排贡献为正，使得总 NO_x 的贡献为 1.94ug/m³。交通源&面源 NO_x 属于低矮排放，刚排出的主要成份为 NO 可快速消耗 O₃，被氧化成为 NO₂，导致 NO_x 减排近地 O₃ 浓度上升现象。

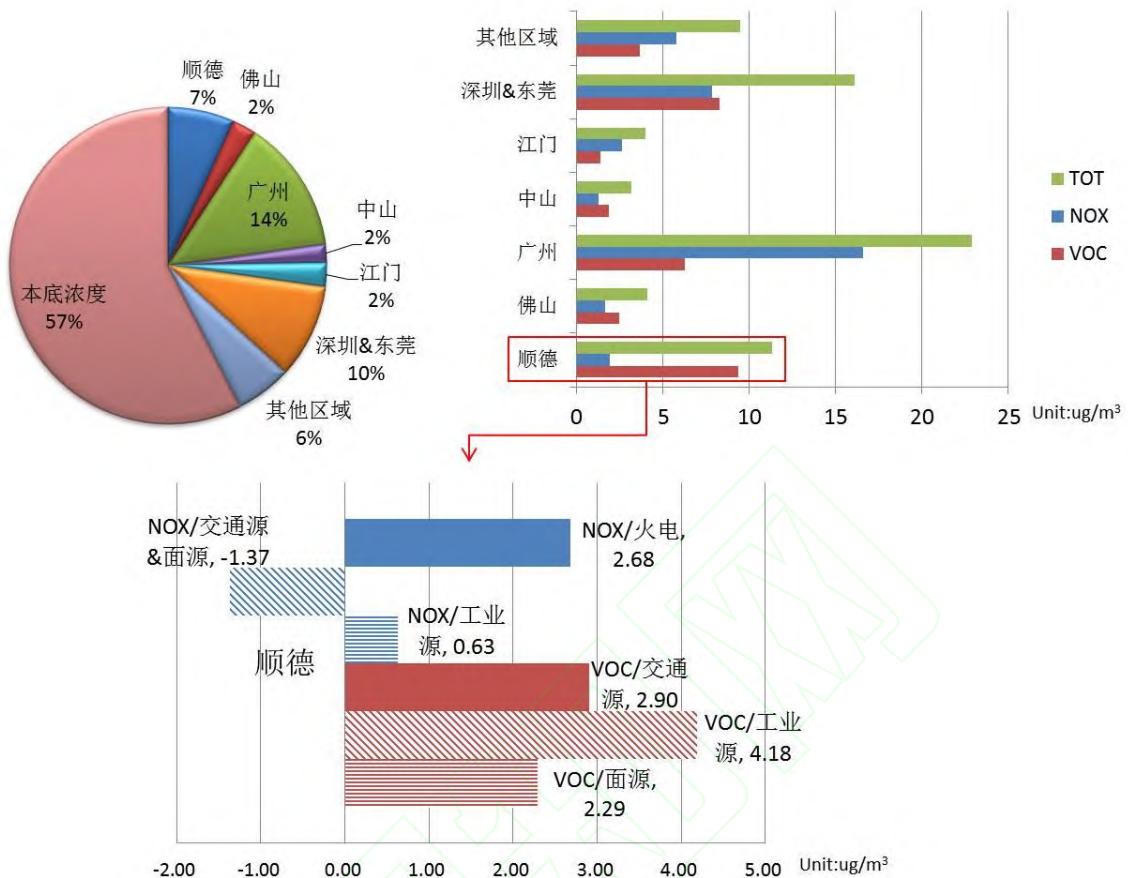


图 8 100%控制情景时的不同区域排放源对顺德区臭氧浓度贡献

Fig. 8 The source contribution analysis of O_3 in Shunde based on 100% control scenario

相对于传统的模型法, RSM/CMAQ 的突出优势在于可以分析不同减排情景下各控制因子的动态贡献。如图 9 所示, 当控制比例在 10% 时, 模拟得到顺德区的 O_3 浓度可降约 $2.36\text{ug}/\text{m}^3$, 广州减排的总体贡献 (TOT) 最大, 其他区域的减排贡献均以 VOCs 的贡献为主。顺德本地 VOCs 削减贡献均为正, 其中工业源的贡献最大, NOx 排放削减贡献均为负, 以交通源&面源的负效应最大; 分析结果表明, 若区域 VOCs 排放不变, 仅削减 10%NOx 时, 顺德区的 O_3 将上升, 验证了图 3 中 PR 值的推论。当总体排放控制比例高达 70% 时, 顺德区 O_3 浓度可下降约 $38.11\text{ug}/\text{m}^3$ (图 9); 其中 NOx 贡献约 $21.19\text{ug}/\text{m}^3$ 、VOCs 贡献约 $16.92\text{ug}/\text{m}^3$; 这说明随着区域协同减排力度增大, 顺德将从 VOCs 控制区向着 NOx 控制区过渡, NOx 的减排对 O_3 浓度削减作用贡献将超过 VOCs。70% 区域减排情景下, 顺德本地 VOCs 减排均属正贡献, 共约 $5.06\text{ug}/\text{m}^3$, 以工业源贡献最大 ($3.15\text{ug}/\text{m}^3$); NOx 总体贡献约 $0.81\text{ug}/\text{m}^3$, 其中交通源&面源为负贡献 ($-1.08\text{ug}/\text{m}^3$)。不同比例的区域减排情景动态源贡献分析结果说明, 低比例减排情景时应强化区域 VOCs 的控制, 以避免 NOx 减排反而 O_3 浓度上升的现象; 顺德本地抑制 O_3 浓度上升的关键在于强化工业源 VOCs 以及火电 NOx 排放的控制。

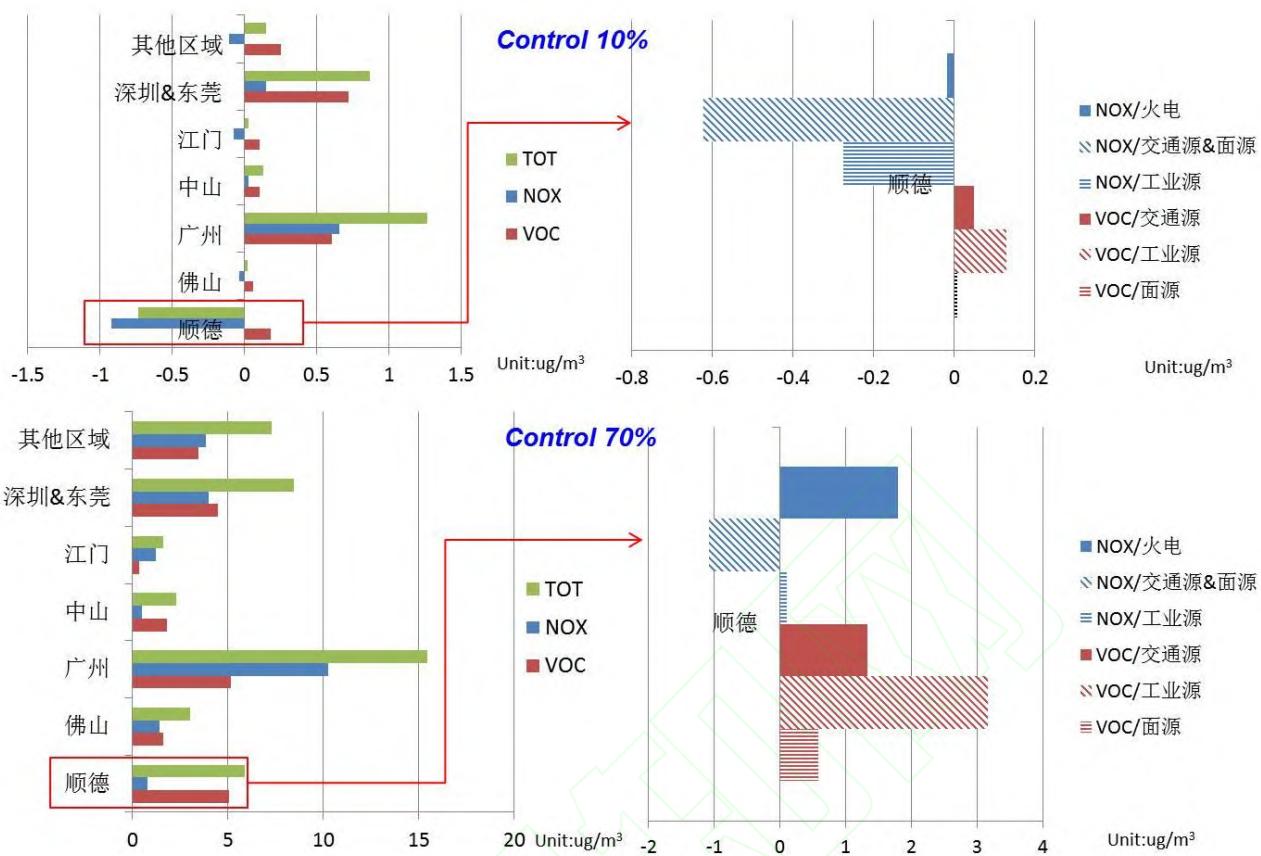


图 9 臭氧动态源贡献分析

Fig. 9 Dynamic source contribution analysis of O_3

4 结论 (Conclusions)

- 论文提出的 RSM/CMAQ 动态源贡献分析方法，是利用所建立的排放控制与环境质量浓度高维曲面响应关系，来解析临近区域的各类排放源在不同控制比例下对污染物环境浓度变化的量化贡献，能让决策者辨识导致污染物环境浓度变化的主要排放源，并据此制定科学的减排方案。
- 论文以顺德区为例，使用RSM/CMAQ量化分析了2014年10月不同来源的NO_x和VOCs对本地O₃浓度的动态贡献。结果表明顺德区O₃浓度受区域排放影响非常明显，最大可削减比例约为43%，其中广州、深圳&东莞排放贡献合计约24%，而顺德本地排放贡献仅7%；若不控制VOCs排放，当区域NO_x小比例(<12%)减排时，顺德区O₃浓度将上升。因此，顺德区抑制O₃浓度升高的关键是VOCs控制，而有效解决O₃污染问题的根源是NO_x、VOCs的区域协同控制。

参考文献(References):

- Appel K W, Chemel C, Roselle S J, et al. 2012. Examination of the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model performance over the North American and European domains[J]. ATMOSPHERIC ENVIRONMENT, 53(SI): 142-155
- Ashok A, Lee I H, Arunachalam S, et al. 2013. Development of a response surface model of aviation's air quality impacts in the United States[J]. Atmospheric Environment, 77: 445-452

- Cho S, Mceachern P, Morris R, et al. 2012. Emission sources sensitivity study for ground-level ozone and PM_{2.5} due to oil sands development using air quality modeling system: Part I- model evaluation for current year base case simulation[J]. ATMOSPHERIC ENVIRONMENT, 55: 533-541
- Cohan D S, Hakami A, Hu Y, et al. 2005. Nonlinear response of ozone to emissions: Source apportionment and sensitivity analysis[J]. Environmental Science & Technology, 39(17): 6739-6748
- Dong X, Li J, Fu J S, et al. 2014. Inorganic aerosols responses to emission changes in Yangtze River Delta, China[J]. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT, 481: 522-532
- Itahashi S, Uno I, Kim S. 2013. Seasonal source contributions of tropospheric ozone over East Asia based on CMAQ - HDDM[J]. Atmospheric Environment, 70: 204-217
- Ito A, Sillman S, Penner J E. 2009. Global chemical transport model study of ozone response to changes in chemical kinetics and biogenic volatile organic compounds emissions due to increasing temperatures: Sensitivities to isoprene nitrate chemistry and grid resolution[J]. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-ATMOSPHERES, 114(D09301)
- Janssens-Maenhout G, Diego V P, Marilena Muntean G. 2013. Global emission inventories in the Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) - Manual (I)[J]. Gridding: EDGAR emissions distribution on global gridmaps, Publications Office of the European Union, Luxembourg
- Li L, Chen C, Huang C, et al. 2011. Ozone sensitivity analysis with the MM5-CMAQ modeling system for Shanghai[J]. Journal of Environmental Sciences, 23(7): 1150-1157
- Lin C, Pongprueksa P, Jr. Russell Bullock O, et al. 2007. Scientific uncertainties in atmospheric mercury models II: Sensitivity analysis in the CONUS domain[J]. ATMOSPHERIC ENVIRONMENT, 41(31): 6544-6560
- Ou J, Zheng J, Li R, et al. 2015. Speciated OVOC and VOC emission inventories and their implications for reactivity-based ozone control strategy in the Pearl River Delta region, China[J]. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT, 530: 393-402
- Wang Q Y, Gao R S, Cao J J, et al. 2015. Observations of high level of ozone at Qinghai Lake basin in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, western China[J]. JOURNAL OF ATMOSPHERIC CHEMISTRY, 72(1): 19-26
- Xie M, Zhu K, Wang T, et al. 2014. Application of photochemical indicators to evaluate ozone nonlinear chemistry and pollution control countermeasure in China[J]. Atmospheric Environment, 99: 466-473
- Xing J, Wang S X, Jang C, et al. 2011. Nonlinear response of ozone to precursor emission changes in China: a modeling study using response surface methodology[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 11(10): 5027-5044
- Xing J, Zhang Y, Wang S, et al. 2011. Modeling study on the air quality impacts from emission reductions and atypical meteorological conditions during the 2008 Beijing Olympics[J]. Atmospheric Environment, 45(10): 1786-1798
- Xu W Y, Zhao C S, Ran L, et al. 2011. Characteristics of pollutants and their correlation to meteorological conditions at a suburban site in the North China Plain[J]. ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS, 11(9): 4353-4369
- Yang J M, Qiu J H, Zhao Y L. 2005. Umkehr observations of vertical ozone distributions of Beijing in recent 13 years//Matvienko G G. PROCEEDINGS OF THE SOCIETY OF PHOTO-OPTICAL INSTRUMENTATION ENGINEERS (SPIE)[M]. BELLINGHAM:SPIE-INT SOC OPTICAL ENGINEERING. 300-307
- Zhao B, Wang S X, Fu K, et al. 2014. Assessing the nonlinear response of fine particles to precursor emissions: development and application of an Extended Response Surface Modeling technique (ERSM v1. 0)[J]. Geoscientific Model Development Discussions, 7: 5049-5085
- Zhu Y, Lao Y, Jang C, et al. 2015. Development and case study of a science-based software platform to support policy making on air quality[J]. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES-CHINA, 27: 97-107
- 劳苑雯, 朱云, Carey Jang, 等. 2012. 基于响应面模型的区域大气污染控制辅助决策工具研发[J]. 环境科学学报(08): 1913-1922
- 邢佳. 2011. 大气污染排放与环境效应的非线性响应关系研究[D]. 清华大学. 135