

基于 MM5 – CAMx – PSAT 的大气污染源分级技术新方法研究

周 颖 程水源 陈东升 郎建垒 隗 潇 赵蓓蓓

(北京工业大学环境与能源工程学院 北京 100124)

摘 要 来自不同地区不同行业相同排放量的大气污染物对城市空气质量的贡献浓度水平, 受污染源方位、距离、区域地形、气象因素等条件的影响, 其影响程度有所差异。将中尺度气象模式 (MM5) 与区域多尺度空气质量模型 (CAMx) 进行三维耦合, 利用其中的源识别模块, 提出了一套大气污染源分级思路, 以北京地区重点源为例, 对不同行业排放源进行了空气质量影响程度分级识别, 从大气污染防治的角度初步提出了需优先控制的工业排放源。基于本文提出的污染源分级体系, 石景山区的电力、冶金行业排放, 大兴区的冶金行业排放, 房山区的电力、建材行业排放以及整体北京地区锅炉行业分级指数较高。在实施污染控制措施时, 需优先控制上述地区行业排放源, 以获得更好的空气质量改善效果。

关键词 MM5 – CAMx – PSAT 排放源 分级

近年来, 随着我国城市化进程的加快和经济的高速发展, 我国的大气污染形势严峻, 区域灰霾天气频发, 已严重影响到人民身体健康, 成为了制约我国未来发展的关键因素。大气污染防治问题最终仍落在科学合理的污染源减排问题上, 而我国目前的污染物减排形势已相当严峻, 如何利用有限的污染物减排空间发挥出改善环境质量的最大效果是当前污染源减排工作急需解决的重要问题。影响大气污染的因素复杂, 来自不同排放地区不同行业相同排放量的大气污染物对城市空气质量的贡献浓度水平, 受污染源方位、距离、区域地形、气象因素等条件的影响, 其影响程度有所差异。当前的污染源控制并未考虑到各地区各行业污染源的环境影响贡献差异, 难以在等量污染物减排的前提下实现减排环境效益的最大化。

在评价排放源对环境的浓度贡献方面, 陈东升等^[1]结合 Models – 3 进行数值模拟, 利用“清零法”来研究分析周边省市排放对北京空气质量的影响。而当研究区域内多地区多污染源的贡献浓度时, 传统的“清零法”计算需要分别清零模拟, 计算量大, 较为耗时, 此外污染物在扩散过程中伴随着复杂的化学反应, 各排放源贡献浓度之和不等于所有排放源的贡献浓度, 因此清零法也会导致一定误差。此外, 肖扬等利用 ADMS 模型计算污染源排放与空气质量的关系^[2], 周昊等^[3]利用 CALPUFF 计算了污染影响矩阵, 确定了辽宁省中部城市群的 SO₂ 总量分配。受到模型限制, 多地区多污染物的排放贡献研究, 计算量巨大, 上述模型难以实现。

近年来随着模型模拟技术的进步, 带有基于伴随矩阵的示踪模块的空气质量模型 (如 CAMx) 可以计算真实气象条件下不同受体网格的小时浓度, 较其他模型而言, 该模型的时间尺度、空间尺度更加精细, 可同时进行多排放源 – 多受体点的排放贡献识别, 极大地提升了计算速度。笔者基于 MM5 – CAMx 耦合模型, 利用污染物来源识别功能, 以北京市重点源排放为研究对象, 研究相同环流背景下北京市各行业重点源单位源强排放对目标区域北京的 SO₂、NO_x、PM₁₀ 浓度贡献, 在此基础上综合考虑各行业不同污染物排放水平, 建立大气污染源分级体系。对分级指数较高的排放源有针对性地实施消减和控制措施, 可通过较少污染物的减排措施获得较大幅度的空气质量改善空间, 提高减排效率。因此, 污染源分级识别对于有效改善环境质量具有重要意义。

一、研究方法

(一) 模型设置

MM5 (Fifth – Generation NCAR/ Penn State Mesoscale Model, 3.6.2 版本) 是美国宾西法尼亚

大学 (PSU) 和美国国家气象中心 (NCAR) 联合开发的有限区域中尺度数值模式^[4], 被广泛应用于各种中尺度天气系统的研究、实时预报、中尺度集成预报、区域气候预报等诸多领域^[5-6]。本文中该模式为 MM5 - CAMx 耦合模式提供经同化后的研究区域气象流场。

CAMx (Comprehensive Air Quality Model with Extensions) 是美国环境技术公司 (ENVIRON) 开发的三维网格欧拉光化学模式, 可模拟气态与粒状污染物平流、扩散、化学反应和干湿沉降等过程。其模拟的范围可从城市至大尺度区域, 支持 CB4、CB05 等机理。此外, 该模型陆续推出了臭氧来源识别和颗粒物来源识别模块, 并在国外得到了广泛应用^[7-8], 在国内也有利用识别模块对电厂源等贡献较大点源的研究^[9]。

本文使用的污染源识别模块主要基于颗粒物来源识别技术 (Particulate Source Apportionment Technology), 简称 PSAT, 能有效地追踪不同地区、不同行业源排放对目标研究区域污染物浓度的贡献。PSAT 考虑了示踪物在物理过程、化学过程中生成、消除、转化过程的模拟。其中化学过程包括前体物的化学转化和颗粒物的生成转化, 如硫酸盐是气态或液态的 SO_2 氧化反应后的二次产物, 硝酸盐是从 NO_x 污染物转化而来。因此 PSAT 不仅对颗粒物可进行来源识别, 对于包含在反应中的气态污染物同样适用, 并有成功应用案例^[10]。应用 PSAT 进行污染物来源识别, 可减少模拟运算时间, 提高模拟预测分析效率。该技术使得污染源分级识别由理论上可行变为实际中可操作。

MM5 经同化处理后输出的逐时三维气象数据通过气象数据处理模块 (MM5camx, 5.1 版本) 完成格式转换使其适用于 CAMx 的输入。所需地形及土地利用数据采用美国地质勘探的全球 30s 分辨率地形资料。气象模式所需的气象背景场和边界条件采用 NCEP (美国国家环境预报中心) 的 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料 (6h 间隔)。空气质量模式所需的污染源排放数据来自课题组前期承担的项目“北京及近周边城市污染源清单和敏感源筛选”^[11], 其中包含了北京 300 余企业重点企业源排放数据, 涉及电力、化工、冶金、建材、锅炉等污染排放主要行业。本文的污染源分级识别即以上述行业排放源为研究对象。图 1 为北京市各主要行业重点源分布情况。

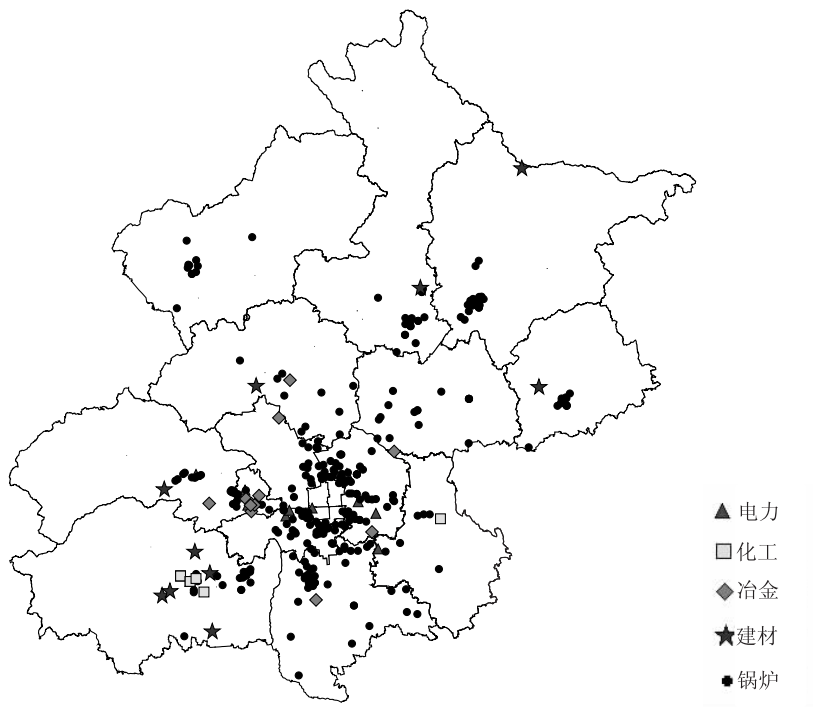


图 1 北京市各主要行业重点源分布

(二) 模拟方案

研究区域如图2所示,分为两重嵌套,中心坐标为39.0°N, 114.0°E。水平方向上,CAMx外层模拟区域覆盖了北京及周边地区,内层模拟区域覆盖了北京地区,网格格距分别为12km和4km,格点数分别为70×76(南北向格点数为76,东西向格点数为70)和49×49;垂直方向上,MM5设置为不等间距的23层,其分辨率在大气低层较高,以便更好描述污染物在大气边界层中的演变过程。利用MM5camx模块将其合并至12层应用于CAMx垂直方向格距设置,其中有8层分布于2km以下,第1层约为40m。MM5物理参数化方案包括MRF行星边界层参数化方案、Grell对流参数化方案、简单冰相过程、云辐射方案及Noah land-surface方案。

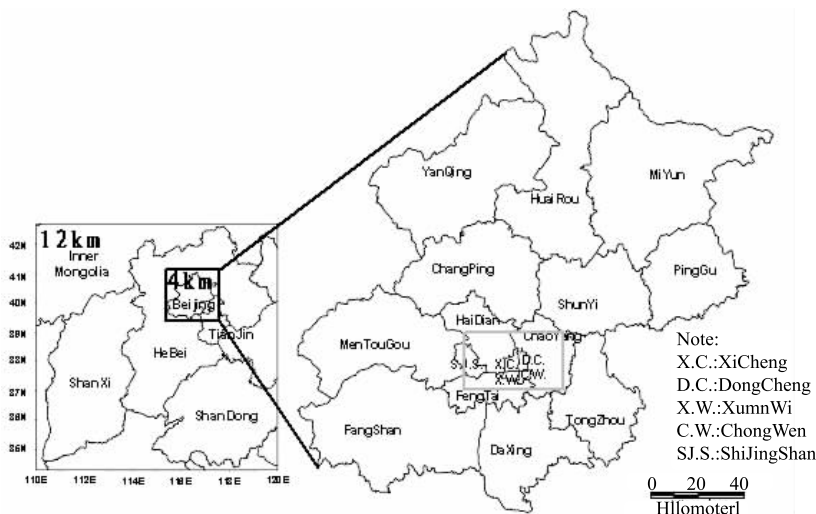


图2 模拟区域嵌套网格及评价控制区域示意图

模拟时间选取2010年的1、4、7、10四个月作为春、夏、秋、冬四季的代表月,4个月的模拟平均值用以代表年均值。选取图2中北京地区的中心区域(如方框所示)作为模型校验评价区域。该区域包括了北京市城近郊区的大部分面积,国控监测点亦在其中。基于GIS技术对北京地区进行网格划分,选取受体点如图3所示,用于评估污染源对北京整体环境质量影响。该受体点均匀分布在北京市城近郊区,受体点浓度模拟结果的空间平均可代表北京整体空气质量水平。

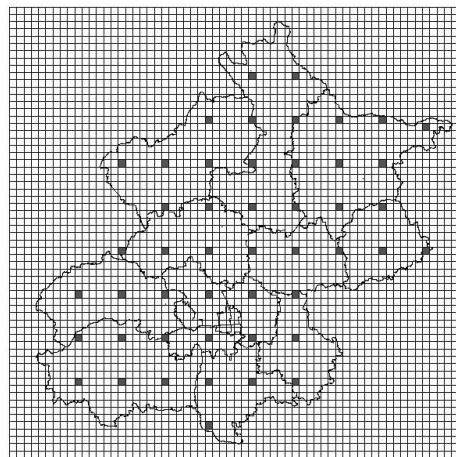


图3 北京地区评价空气质量影响受体点示意图

(三) 污染源分级思路

通过模式计算进行污染物来源识别,本文主要以SO₂, NO_x, PM₁₀为例进行初步的分级思路探索。计算某行业排放源对目标区域的污染物环境浓度贡献,考虑不同污染物毒性差异,将浓度贡献值进行多污染物归一化处理,定义多污染物综合敏感因子SI为:

$$SI_i = \sum_j \frac{C_{i,j}}{E_{i,j}S_j} \quad (1)$$

式中, i ——排放行业 i ;

j ——污染物 j , 包括 SO_2 , NO_x , PM_{10} ;

$C_{i,j}$ ——排放行业 i 排放的污染物 j 对所有受体点的平均贡献浓度 (年均值), $\mu\text{g}/\text{m}^3$;

$E_{i,j}$ ——排放行业 i 污染物 j 的年排放量, t/a ;

S_j ——污染物 j 的环境质量二级标准, $\mu\text{g}/\text{m}^3$;

该指标反映了多种作用因素, 包括空间距离因素、污染物迁移扩散规律、气象条件、地形因子和污染源状况, 因此以此指标代表各行业在等量排放水平下 (即 1t) 对环境浓度的贡献。

基于排放信息计算不同地区不同行业排放源等标污染排放负荷 P , 该值在一定程度上反映了污染源的实际排放水平;

$$P_i = \sum_j \frac{E_{ij}}{S_j} \quad (2)$$

式中, i ——排放行业 i ;

j ——污染物 j , 包括 SO_2 , NO_x , PM_{10} ;

$E_{i,j}$ ——排放行业 i 污染物 j 的年排放量, t/a ;

S_j ——污染物 j 的环境质量二级标准, $\mu\text{g}/\text{m}^3$;

对多污染物综合敏感因子及等标污染排放负荷利用极差法分别进行归一化处理, 得到敏感因子归一化指数 SIN 及排放负荷归一化指数 PN, 以此作为污染源分级依据; 根据环境管理侧重分别对 SIN 及 PN 分别赋予权重 (0 ~ 1) 对其进行加权加和 (本文将两者同等看重, 分别赋权重 0.5), 得到污染源分级指数 CI; 对污染源分级指数 CI 再次进行归一化处理, 所有指数在 0 ~ 1 之间, 根据分级标准确定各类污染源等级。污染源分级流程与分级标准如下图所示。

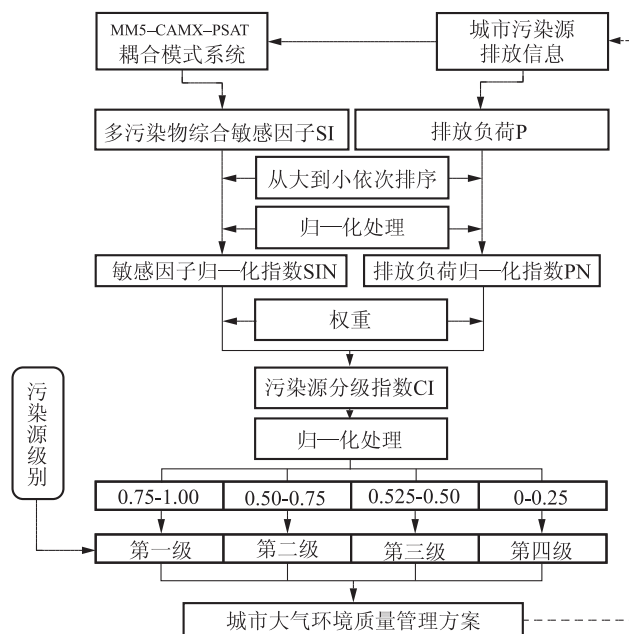


图4 污染源分级流程图

二、案例研究结果

(一) 模式验证

为了检验 MM5 - CAMx 耦合模式模拟北京地区环境质量浓度的效果, 本文以 PM_{10} 为例, 选

取 2005 年 1、4、7、10 四个月为四季代表月，通过日均监测值 ρ_0 与日均模拟值 ρ_s 的对比来整体评估模式系统的准确程度。图 5 为日均监测值 ρ_0 与日均模拟值 ρ_s 的散点图，可见 PM_{10} 日均模拟值与日均监测值对应效果较好，Pearson 相关系数为 0.70。气态污染物模拟的校验效果可见笔者所在研究小组之前的研究结果^[10]。在此不再详述。因此，认为本研究选取的模式模拟结果可有效反映北京地区空气质量变化情况。

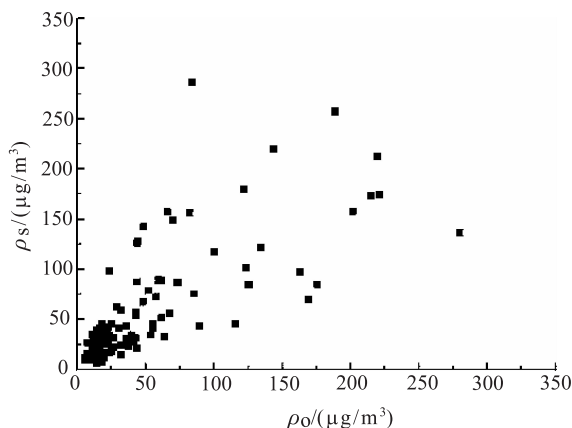


图 5 PM_{10} 日均模拟质量浓度与监测质量浓度对比

(二) 北京地区重点源分级识别

北京地区敏感排放行业识别结果如图 6 所示。研究结果显示，从各区域单个行业来看，石景山区的电力、冶金行业排放，大兴区的冶金行业排放，房山区的电力、建材行业排放，敏感分级指数相对较高，均在 0.5 以上，尤其是石景山区的电力和大兴的冶金，分别达到了 1.0 和 0.94。造成上述行业排级别较高的原因是：（1）房山与大兴位于污染物的西南输送通道上，石景山位于主城区，更利于污染物向整个北京的扩散；（2）同时上述地区及行业排放负荷相对较大。从北京整体来看，虽然单个区县的锅炉排放级别不高，但由于大部分区县都存在此类行业排放，使得锅炉行业在北京的分级指数之和较高，达到了 5.26，其次为电力，分级指数之和为 2.40，化工最小，仅为 0.54。从各区县来看，房山区、石景山区和大兴区各行业分级指数之和最大，分别为 1.88、1.77 和 1.41。

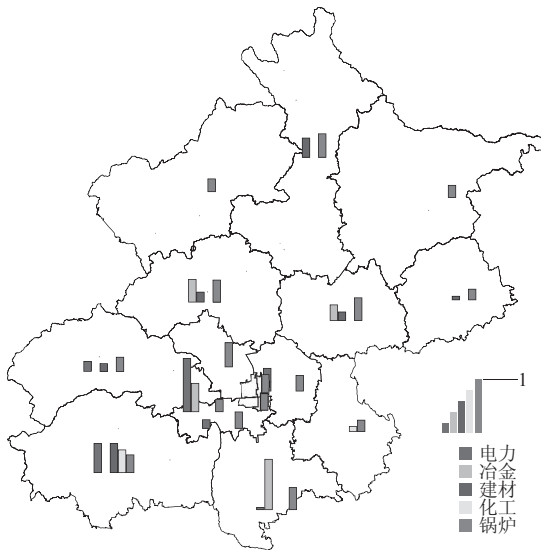


图 6 北京市重点源各行业排放分级指数

因此,从一次污染物排放控制及大气环境管理的角度出发,在实施污染控制措施时,应优先针对石景山区的电力、冶金行业,大兴区的冶金行业,房山区的电力、建材行业排放实施消减措施。从北京整体来看,需加强北京锅炉行业、电力行业的排放控制。而在优先实施控制措施的地区选择上,着眼点建议优先放在房山区、石景山区及大兴区。

三、结 语

本文基于 MM5 - CAMx - PSAT 耦合模式,综合考虑污染源等量排放对污染物环境浓度的贡献及排放负荷,建立了一套大气污染源分级思路,以北京地区重点源为研究案例,对不同行业排放源进行了分级识别,分级指数较高的行业意味着从大气污染防治的角度需优先控制。研究结果显示,石景山区的电力、冶金行业排放,大兴区的冶金行业排放,房山区的电力、建材行业排放以及整体北京地区锅炉行业分级指数较高。建议制定污染控制方案时,优先考虑上述地区及行业排放源,将获得较好的空气质量改善效果。

参 考 文 献

- [1] Chen D. S. , Cheng S. Y. , Liu L. , et al. An integrated MM5 - CMAQ modeling approach for assessing trans - boundary PM10 contribution to the host city of 2008 Olympic Summer Games e Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41: 1237 - 1250.
- [2] 肖杨,毛显强,马根慧. 基于 ADMS 和线性规划的区域大气环境容量测算 [J]. 环境科学研究, 2008, 21 (3): 13 - 16
- [3] 周昊,李元宜. 区域大气环境容量测算及二氧化硫总量平衡分配研究 [J]. 气象与环境学报, 2006, 22 (5): 19 - 23.
- [4] Anthes, R. A. , Warner, T. T. Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies [J]. Monthly Weather Review, 1978, 106: 1045 - 1078.
- [5] Chen, F. , Dudhia, J. Coupling an advanced land - surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity [J]. Monthly Weather Reviews, 2001, 129: 569 - 585.
- [6] Chen D S , Cheng S Y, Liu L, et al. Assessment of the Integrated ARPS - CMAQ Modeling System through Simulating PM10 Concentration in Beijing, China [J]. Environmental Engineering Science, 2008, 25: 191 - 205.
- [7] BONYOUNG K, GARY M W, RALPH E M, et al. Comparison of source apportionment and sensitivity analysis in a particulate matter air quality model [J]. Environmental Science Technology, 2009, 43: 6669 - 6675.
- [8] KRISTINA M W, SPYROS N P, GREG Y, et al. Development and application of a computationally efficient particulate matter apportionment algorithm in a three - dimensional chemical transport model [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42 (22): 5650 - 5659.
- [9] 黄青,程水源,陈东升等. 近周边电厂源对北京市采暖期间 SO₂ 的贡献分析 [J]. 环境科学研究, 2009, 22 (5): 567-573.
- [10] 黄青,程水源,陈东升,等. 北京市一次 SO₂ 污染过程来源分析 [J]. 环境科学与技术. 2010, 33 (1): 89 - 93.
- [11] 北京工业大学. 北京及近周边城市污染源清单和敏感源筛选 [R]. 2012.