

华北电厂源对北京及周边地区 SO₂ 影响

黄 青, 程水源, 陈东升, 赵秀勇, 郭秀锐, 王海燕

(北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100124)

摘 要: 采用 MM5、Models-3/CMAQ 耦合模型系统, 模拟了河北、天津、山西、内蒙古 4 省市电厂源排放对北京及周边地区 SO₂ 质量浓度影响. 模拟结果表明, 电厂源对华北地区 SO₂ 年均贡献质量浓度高值多出现在电厂密集、污染物排放量大的地区, 且从南到北呈递减趋势, 北京城区、北京全市 1 月月均贡献质量浓度分别为 7.63 和 7.13 μg/m³, 4 月分别为 5.54 和 5.37 μg/m³, 7 月分别为 3.02 和 3.68 μg/m³, 10 月分别为 7.49 和 7.53 μg/m³, 年均贡献质量浓度分别为 5.92 和 5.93 μg/m³, 其中日均最大贡献质量浓度出现在 1 月, 为 30.1 和 19.1 μg/m³, 分别占国家空气质量二级标准的 20.1% 和 12.7%. 研究表明, 华北地区电厂源排放对北京市 SO₂ 空气质量影响是不能忽视的, 能够促使和加剧北京市的大气环境污染.

关键词: 电厂; 大气环境; 耦合模型; 二氧化硫

中图分类号: X 51

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2009)10-1389-07

电厂是现代城市功能的重要组成部分, 为国民经济生产和人民生活提供电能、热能、蒸汽等多种形式的能源供应, 同时电厂也是大气污染排放的重要来源, 其排放污染物主要有烟尘、SO₂、CO、CO₂、NO_x、碳氢化合物和重金属. 电厂排放源具有污染物排放量大、排放口高等特点, 因此在大气环流的作用下极易发生污染物的远距离输送, 影响周边地区的大气环境质量.

当前我国能源和环境矛盾比较突出, 以煤炭为主的能源利用结构在短时期内将不会有根本的改变. 有关资料显示, 截止 2005 年底, 全国火电约占总容量的 75.67%, 水电约占总容量的 22.70%, 而核电、风电仅占总容量的 1.32% 和 0.20%, 大量火电厂的存在导致了大量污染物的排放. 我国环境统计公报显示, 2005 年我国电力行业 SO₂、烟尘排放位于工业行业排放的首位, 分别占工业行业排放的 58.9% 和 47.4%, 大量污染物的排放不仅影响到大气环境质量, 同时能对自然环境和生物体造成负面危害.

针对北京市大气环境污染状况, 国内外学者从污染物来源^[1-2]、气象特征^[3-5]、化学成分^[6]等角度进行了大量的研究, 研究表明, 北京市大气环境质量不仅受本地排放源的影响, 周边地区污染物的跨边界输送也是不能忽略的^[7-8]. 由于电厂具有污染物排放量大、排放口高等特点, 其对北京及周边地区大气环境质量影响一直是学者们关注的热点. 薛志刚等^[9-10]运用 ISC3 模型模拟研究了北京市重要电厂对周边区域大气环境的影响; Hao 等^[11]运用 CALPUFF 模型研究分析了北京市电厂源排放对周边区域大气环境的年均贡献情况; 陈义珍等^[12]运用 ATMOS 模型模拟研究了“西电东送”火电规划对北京市大气质量的年均贡献情况. 目前我国电力行业除尘设备普及率高, 颗粒物排放量较小, 对大气环境质量的影响相对较小, 但电力行业 SO₂ 排放量大, 一直是 SO₂ 排放主要来源之一. 为此, “十一五”期间国家制定了 SO₂ 减排规划, 力图减少电厂等重点行业 SO₂ 排放.

本研究将结合我国现阶段电厂源排放特点, 采用高时空分辨率的 MM5、Models-3/CMAQ 耦合模型系统, 研究分析不同季节代表月华北 4 省市电厂 SO₂ 排放对北京及周边地区大气环境质量的影响, 为控制区域电厂排放, 科学有效的改善北京及华北地区空气质量提供科学依据.

收稿日期: 2008-09-18.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2005CB724201); 国家自然科学基金资助项目(50878006).

作者简介: 黄 青(1981-), 男, 湖南常德人, 博士研究生.

1 研究方法

1.1 模型介绍

采用美国环保总局公布的 Models-3/CMAQ 空气质量模式,它是美国 EPA 对各种大气物理、化学模式系统化以应用于环境影响评价及决策分析而发展的模型系统,适用于对城市和区域尺度对流层 SO_2 、酸沉降、 O_3 、能见度、细粒子等 80 多种污染物的数值模拟^[13]. 为模拟大气中的气相与液相化学过程、非均相化学过程、气溶胶过程等复杂的化学转化过程,该模式选用能定量描述反应过程、并适应计算机运行的典型归纳机理 CB2 IV 光化学反应机制. 该化学机制包括 36 种化学反应物、93 种化学反应和 11 种光分解率.

MM5(Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model)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. 模式具有多重嵌套功能、采用非静力的动力框架并采用地形追随的 Sigma 坐标系,模拟精度可达到几公里^[14]. 自 20 世纪 70 年代问世以来,因其对中尺度以及区域尺度的大气环流的模拟及预报具有较好的效果而在国内外得到广泛研究及应用. 目前 MM5 已被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、航空航海的天天气条件保障、模拟产生军事训练和分析的协同环境以及空气质量和大气化学研究中.

1.2 模拟方案

本研究以北京及周边地区为目标研究区域(如图 1 所示),包括北京、天津、河北、山西和内蒙古部分地

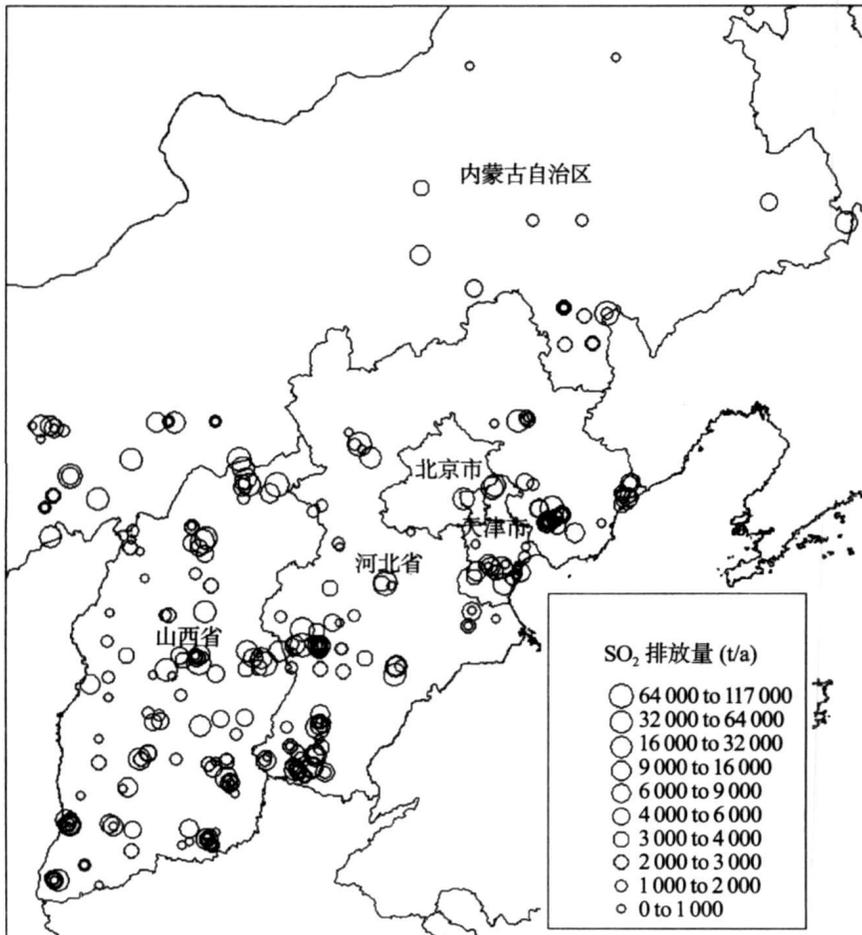


图 1 华北 4 省市电厂源 SO_2 排放地理分布(t/a)

Fig.1 SO_2 emission spatial distribution from power plants in four regions in North China (t/a)

区. 空气质量模式水平方向采用分辨率为 9 km 单层网格结构, 网格数为 132×144. 在垂直方向上, CMAQ 采用地形追随坐标系, 为不等距网格, 共 12 层, 其分辨率在大气低层较高, 并随高度逐渐降低(第 1 层约为 40 m), 其中有 8 层分布在 2 km 以下, 以便更好地描述污染物在大气边界层中的演变过程.

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°×1°再分析资料(6 h 间隔), 地形及土地利用数据采用美国地质勘探的全球 30 s 分辨率地形资料, 另外还收集了模拟区域内各气象站 2005 年气象资料, 对气象场进行同化处理.

华北地区污染源排放清单由“北京与周边地区大气污染物输送、转化及北京市空气质量目标研究”项目调查提供, 收集了华北地区各省市(包括北京、天津、河北、山西、内蒙古)2005 年大气污染排放资料和相关环境、经济统计数据, 建立华北地区污染源清单, 污染因子包括 PM、SO₂、NO_x、NH₃、VOCs, 其中北京市调查统计到各乡镇, 北京周边省市调查统计到区县. 2005 年华北地区电厂源排放清单(包括天津、河北、山西、内蒙古)共有 379 家电厂, 总装机容量为 53 000 MW, 电厂位置和 SO₂ 排放情况如图 1 所示. 本研究利用地理信息系统(GIS)作为污染源数据库的可视化载体, 建立具有更新、查询、空间分析等多种功能的 GIS 数据库^[15], 并使用 SOMKE 源清单处理系统为空气质量模式 Models-3 提供污染源空间网格数据.

2 结果分析

2.1 模式验证

为了对 MM5、Models-3/CMAQ 耦合模型系统对北京及周边地区 SO₂ 质量浓度模拟的有效性进行验证, 选取北京、石家庄、邯郸、沧州 4 个城市为该地区代表城市, 选取 1、4、7、10 四个月为四季代表月, 建立每天日均监测值 ρ_0 与日均模拟值 ρ_s 的散点图评估模式系统的准确程度. 从图 2 可以看出, 各城市 SO₂ 日均模拟值与日均监测值对应效果较好, 大部分点均落在有效区之内, 北京、石家庄、邯郸、沧州 Pearson 相关系数分别为 0.770、0.654、0.797、0.889, 说明模式模拟结果具有较高的有效性和可信性. 因此, 可认为本研究选取的模式和设计方案对北京及周边地区 SO₂ 污染状况的模拟是可行的, 模式模拟结果可有效反映北京及周边地区空气质量现状及其变化情况.

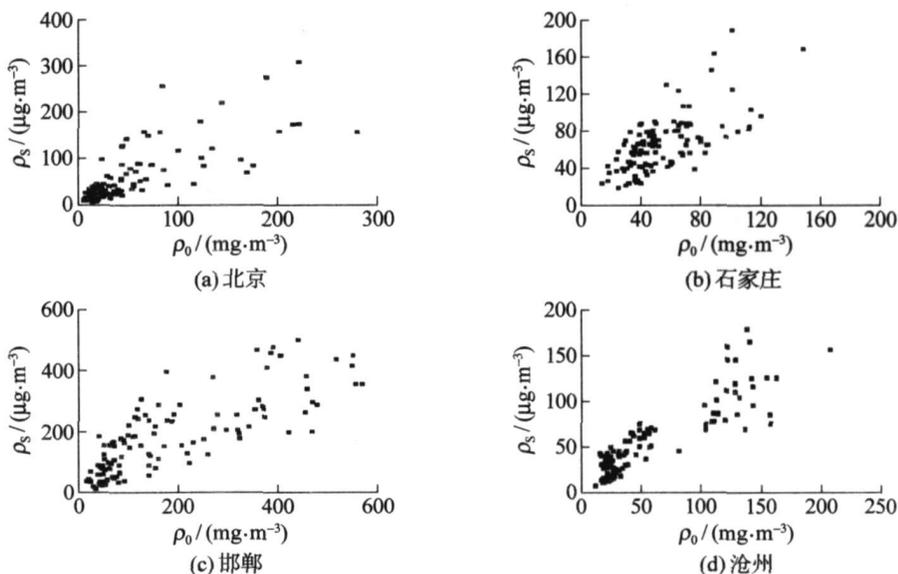


图 2 SO₂ 日均模拟质量浓度与监测质量浓度对比

Fig. 2 Comparison of simulation and monitoring SO₂ daily average concentration

2.2 代表月贡献质量浓度影响分析

为了评估分析华北地区电厂源的影响,分别模拟了4个代表月电厂源对研究区域SO₂的质量浓度贡献.对SO₂月均贡献质量浓度值分析发现,SO₂高质量浓度多出现在电厂密集、污染物排放量大的地区,如河北省的西南和东北部地区(石家庄、邢台、邯郸、唐山)、天津东南部地区、山西中东部地区、内蒙古西南部地区(鄂尔多斯、呼和浩特),SO₂贡献质量浓度地理分布见图3所示.1月电厂源排放对华北地区大气环境质量影响范围广,贡献质量浓度较高,河北南部大部分地区、山西东部、河南北部月均值达到10 μg/m³,其中石家庄、邢台、邯郸部分地区月均值高达18 μg/m³;4月电厂源排放对华北地区大气环境质量影响范围较小,贡献质量浓度偏低,河北南部、山西中东部地区质量浓度值在7~12 μg/m³,出现18 μg/m³高值的范围小,仅出现在较大的电厂源附近;7月电厂源排放对华北地区的大气环境质量影响范围最小,高值多分布在电厂源周围,但局部地区贡献值高于其他代表月,达到60 μg/m³;10月电厂源排放对华北地区大气环境质量影响范围较大,质量浓度贡献值较高,与1月类似,河北南部大部分地区、山西中东部和河南北部部分地区月均值达到10 μg/m³,其中石家庄、邢台、邯郸部分地区月均值高达18 μg/m³.4个代表月月均贡献最大值都位于鹿泉市(原获鹿县)与石家庄市周围,其中1月为52.1 μg/m³,4月为42.4 μg/m³,7月为78.2 μg/m³,10月为54.9 μg/m³.

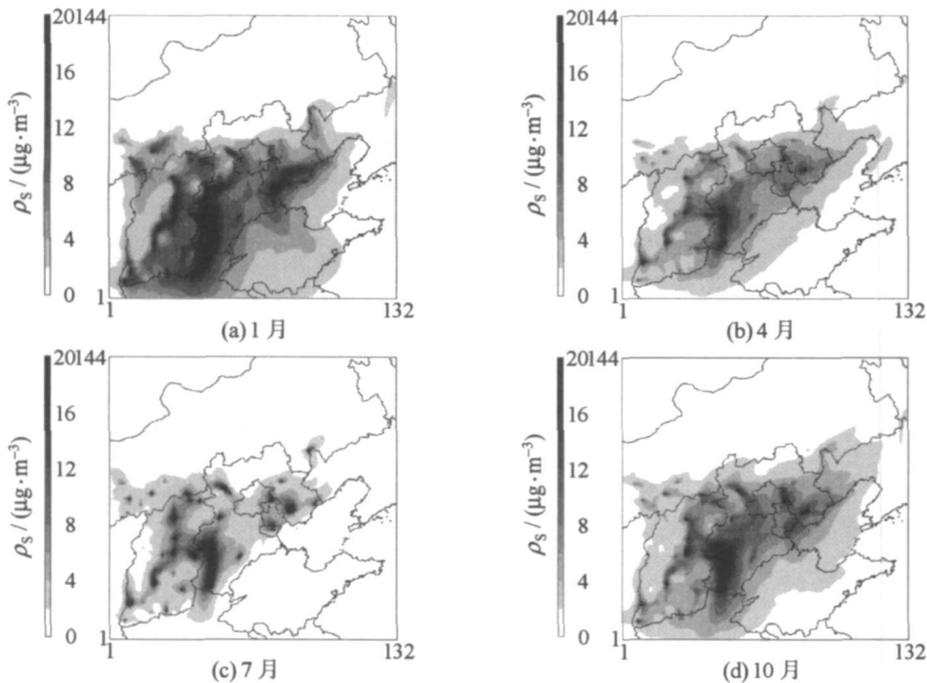


图3 2005年电厂源排放对区域SO₂月均贡献质量浓度分布(μg/m³)

Fig.3 The SO₂ monthly concentration spatial distribution in 2005 (μg/m³)

从图3可以看到,华北地区电厂对北京市SO₂质量浓度有一定影响,贡献质量浓度从南到北呈递减趋势.华北地区电厂对北京城区、北京全市SO₂质量浓度影响情况较为接近,其中1月对北京城区、北京全市月均贡献质量浓度分别为7.63和7.13 μg/m³,4月对北京城区、北京全市月均贡献质量浓度分别为5.54和5.37 μg/m³,7月对北京城区、北京全市月均贡献质量浓度分别为3.02和3.68 μg/m³,10月对北京城区、北京全市月均贡献质量浓度分别为7.49和7.53 μg/m³.最大月均质量浓度出现在1月和10月,而由于1月处于采暖季,各种能源消耗量大,由此产生的SO₂排放量大,因此1月份电厂SO₂排放对北京及华北地区影响较为显著,能够促使和加剧区域大气环境污染.

图4为电厂源对北京城区、北京全市SO₂逐日贡献质量浓度曲线图.可以看到在不同的气象条件下贡献质量浓度出现较大波动,其中1月最大日均质量浓度分别为30.1和19.1 μg/m³,4月最大日均质量

浓度分别为 18.8 和 15.0 μg/m³, 7 月最大日均质量浓度分别为 9.5 和 9.4 μg/m³, 10 月最大日均质量浓度分别为 25.2 和 19.0 μg/m³. 北京城区、北京全市日均最大贡献质量浓度出现在 1 月, 分别占国家空气质量二级标准的 20.1% 和 12.7%.

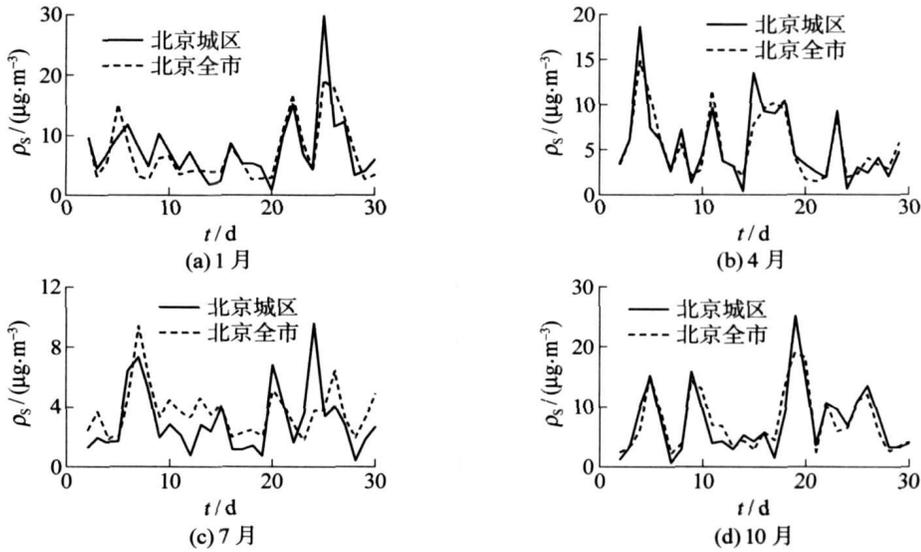


图 4 电厂源排放对北京城区、北京全市 SO₂ 逐日贡献质量浓度曲线(μg/m³)

Fig. 4 The SO₂ daily concentration in urban and entire region of Beijing (μg/m³)

2.3 年平均贡献质量浓度影响分析

对代表月 1、4、7、10 贡献质量浓度平均得到年平均贡献质量浓度, 其地理分布如图 5 所示. 从图 5 可以看到电厂排放对华北地区大气环境质量影响范围广, 质量浓度贡献较大, 其中河北南部大部分地区、山西中东部、河南北部年均值达到 10 μg/m³, 石家庄、邢台、邯郸部分地区以及各主要电厂源周围年均值高达 18 μg/m³. 年平均贡献质量浓度最大值位于鹿泉市与石家庄市周围, 为 56.9 μg/m³.

华北地区电厂排放对北京市 SO₂ 质量浓度影响从南到北呈递减趋势, 其中房山、门头沟影响最大, 怀柔、延庆影响最小, 对北京全市、北京城区年均贡献质量浓度分别为 5.93 和 5.92 μg/m³, 均占国家空气质量二级标准的 9.9%. 华北地区电厂 SO₂ 贡献质量浓度占北京城区 SO₂ 年均质量浓度的 11.8%.

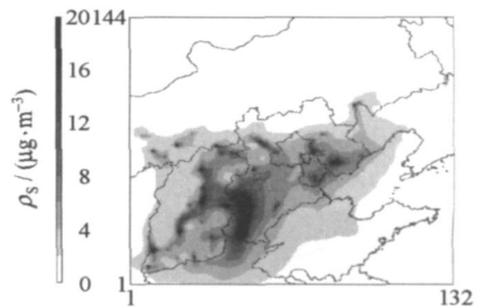


图 5 2005 年电厂源排放对区域 SO₂ 年均贡献质量浓度分布(μg/m³)

Fig. 5 The SO₂ annual concentration spatial distribution in 2005 (μg/m³)

3 结论

本研究采用 MM5、Models-3/CMAQ 耦合模型系统, 模拟了河北、天津、山西、内蒙古 4 省市电厂污染源排放对北京及周边地区 SO₂ 质量浓度的影响. 研究结果发现:

1) 电厂源对华北地区 SO₂ 月均质量浓度贡献高值多出现在电厂密集、污染物排放量大的地区, 如河北省的西南和东北部地区(石家庄、邢台、邯郸、唐山)、天津东南部地区、山西中东部地区、内蒙古西南部地区(鄂尔多斯、呼和浩特), 其中月均贡献最大值位于鹿泉市(原获鹿县)与石家庄市周围.

2) 电厂源对北京城区、北京全市 SO_2 日均最大贡献质量浓度出现在 1 月, 分别为 30.1 和 $19.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 占国家空气质量二级标准的 20.1% 和 12.7% 。

3) 电厂源对北京市 SO_2 质量浓度影响从南到北呈递减趋势, 其中房山、门头沟影响最大, 怀柔、延庆影响最小, 对北京城区、北京全市年均贡献质量浓度分别为 5.92 和 $5.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 均占国家空气质量二级标准的 9.9% 。华北地区电厂源排放对北京市 SO_2 空气质量影响是不能忽视的, 能够促使和加剧北京市大气环境污染。

参考文献:

- [1] CHENG S Y, CHEN D S, LI J B, et al. The assessment of emission-source contributions to air quality by using a coupled MM5-ARPS-CMAQ modeling system: a case study in the Beijing metropolitan region, China[J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22: 1601-1616.
- [2] 赵秀勇, 程水源, 陈东升, 等. 应用 ARPS-CMAQ 模拟研究石景山污染对北京的影响[J]. 环境科学学报, 2007, 27(12): 2074-2079.
ZHAO Xiu-yong, CHENG Shui-yuan, CHEN Dong-sheng, et al. Simulating the effect of Shijingshan emissions on Beijing by coupling models ARPS-CMAQ[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(12): 2074-2079. (in Chinese)
- [3] 苏福庆, 高庆先, 张志刚, 等. 北京边界层外来污染物输送通道[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1): 26-40.
SU Fu-qing, GAO Qing-xian, ZHANG Zhi-gang, et al. Transport pathways of pollutants from outside in atmosphere boundary layer[J]. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(1): 26-40. (in Chinese)
- [4] 范清, 程水源, 苏福庆, 等. 北京夏季典型环境污染过程个例分析[J]. 环境科学研究, 2007, 20(5): 12-19.
FAN Qing, CHENG Shui-yuan, SU Fu-qing, et al. Example analysis of typical environment pollution process in the summer in Beijing[J]. Research of Environmental Sciences, 2007, 20(5): 12-19. (in Chinese)
- [5] 陈朝晖, 程水源, 苏福庆, 等. 华北区域大气污染过程中天气型和输送路径分析[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1): 17-21.
CHEN Zhao-hui, CHENG Shui-yuan, SU Fu-qing, et al. Analysis of synoptic patterns and transports during regional atmospheric pollution process in North China[J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(1): 17-21. (in Chinese)
- [6] 韩力慧, 庄国顺, 程水源, 等. 北京地面扬尘的理化特性及其对大气颗粒物污染的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(1): 1-8.
HAN Li-hui, ZHUANG Guo-shun, CHENG Shui-yuan, et al. Characteristics of re-suspended road dust and its significant effect on the air-borne particulate pollution in Beijing[J]. Environmental Science, 2009, 30(1): 1-8. (in Chinese)
- [7] CHEN D S, CHENG S Y, LI J B, et al. Application of LIDAR technique and MM5-CMAQ modeling approach for the assessment of winter PM_{10} air pollution: a case study in Beijing, China[J]. Water, Air and Soil Pollution, 2007, 181: 409-427.
- [8] CHEN D S, CHENG S Y, LIU L, et al. An integrated MM5-CMAQ modeling approach for assessing trans-boundary PM_{10} contribution to the host city of 2008 Olympic summer games—Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(6): 1237-1250.
- [9] 薛志钢, 柴发合, 段宁, 等. 运用 ISC3 模型模拟电厂脱硫后的大气环境影响[J]. 环境科学研究, 2003, 16(5): 62-64.
XUE ZHI-gang, CHAI Fa-he, DUAN Ning, et al. Applying ISC3 model to simulate the atmospheric environmental impact of power plant after desulfurization[J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(5): 62-64. (in Chinese)
- [10] 薛志钢, 郝吉明, 陈复, 等. 火电厂对城市空气质量的影响模拟[J]. 环境工程, 2003, 21(6): 72-75.
XUE Zhi-gang, HAO Ji-ming, CHEN Fu, et al. Modelling of the city atmospheric quality impact of power plant [J]. Environmental Engineering, 2003, 21(6): 72-75. (in Chinese)
- [11] HAO J M, WANG L T, SHEN M J, et al. Air quality impacts of power plant emissions in Beijing[J]. Environmental Pollution, 2007, 147: 401-408.
- [12] 陈义珍, 柴发合, 段宁, 等. “西电东送”火电规划对北京空气质量的影响[J]. 环境科学研究, 2003, 16(6): 46-52.
CHEN Yi-zhen, CHAI Fa-he, DUAN Ning, et al. Study on air quality impact in Beijing from thermal power planning for the northern passageway of the west-east power transfer project [J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(6): 46-52. (in Chinese)

- [13] ROBIN L D, DAEWON W B, JOAN H N, et al. The next generation of integrated air quality modeling: EPA's models-3[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(12): 1925-1938.
- [14] TRUSILOVA K, JUNG M, CHURKINA G, et al. Urbanization impacts on the climate in Europe: numerical experiments by the PSU-NCAR Mesoscale Model (MM5)[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(5): 1442-1455.
- [15] 赵秀勇, 程水源, 田刚, 等. 北京市施工扬尘污染与控制[J]. *北京工业大学学报*, 2007, 33(10): 1086-1090.
ZHAO Xiu-yong, CHENG Shui-yuan, TIAN Gang, et al. Construction fugitive dust pollution and control in Beijing[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2007, 33(10): 1086-1090. (in Chinese)

SO₂ Air Quality Impact on Beijing and Surrounding Region From Power Plant Emissions in North China

HUANG Qing, CHENG Shui-yuan, CHEN Dong-sheng, ZHAO Xiu-yong, GUO Xiu-rui, WANG Hai-yan
(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: An integrated MM5, Models-3/CMAQ modeling system was applied to study SO₂ air quality in Beijing and its surrounding regions by the effects of power plant emissions from Hebei, Tianjin, Shanxi and Inner Mongolia. The result of simulation indicated that high SO₂ concentration was appeared in regions with high density of power plants and high emissions magnitude. SO₂ concentration in Beijing was decreased from south to north, with monthly concentration of 7.63 and 7.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in January, monthly concentration of 5.54 and 5.37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in April, monthly concentration of 3.02, 3.68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in July, monthly concentration of 7.49, 7.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in October, and annual concentration of 5.92 and 5.93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in 2005, for urban and entire city of Beijing, respectively. The maximal daily concentrations of urban and entire city of Beijing were 30.1 and 19.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in January, which were 20.1% and 12.7% of the class II national air quality standard. Power plant emissions in north China induce or enhance air pollution in Beijing, which should not be neglected.

Key words: power plant; atmospheric environment; coupling model; sulfur dioxide

(责任编辑 张 蕾)