

赵秀勇,程水源,陈东升,等. 2007. 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, 27(12): 2074-2079
Zhao X Y, Cheng S Y, Chen D S, et al. 2007. Simulating the effect of Shijingshan emissions on Beijing by coupling models ARPS-CMAQ[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 27(12): 2074-2079

应用 ARPS-CMAQ 模拟研究石景山污染对北京的影响

赵秀勇,程水源*,陈东升,郭秀锐 王海燕

北京工业大学环境与能源工程学院,北京 100022

收稿日期:2006-11-21 修回日期:2007-04-24 录用日期:2007-09-12

摘要:建立了中尺度气象模型 ARPS 与区域多尺度空气质量模型 CMAQ 的耦合模型系统,应用该模型系统模拟研究了 2002 年 1 月份和 8 月份石景山区污染物排放对北京市空气质量的影响. 模拟结果显示,1、8 两个月份石景山区污染对北京市 PM_{10} 的月均贡献浓度分别为 $29.68 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $32.09 \mu g \cdot m^{-3}$,其中污染较重日的日均贡献浓度在 $50 \mu g \cdot m^{-3}$ 左右,说明石景山污染对北京市空气质量影响较大. 同时,进一步对两月典型污染过程进行深入分析,研究发现,在所选两个污染过程中,石景山对北京 PM_{10} 的贡献浓度与监测浓度同步升高或降低. 首先,在污染过程的前期,石景山贡献浓度较低且变化不大,之后贡献浓度与监测浓度同步快速上升,该阶段贡献浓度增量对监测浓度增量的贡献较大,分别占到了同期各自监测浓度增量的 52.89% 和 44.78%,最后,贡献浓度与监测浓度同步降低,说明,在所选污染过程中贡献浓度短时间内的迅速增加是导致北京市监测浓度骤然升高的一个重要原因.

关键词:北京;ARPS-CMAQ 耦合模式;数值模拟;污染贡献

文章编号:0253-2468(2007)12-2074-06 中图分类号:X823 文献标识码:A

Simulating the effect of Shijingshan emissions on Beijing by coupling models ARPS-CMAQ

ZHAO Xiuyong, CHENG Shuiyuan*, CHEN Dongsheng, GUO Xiurui, WANG Haiyan

College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022

Received 21 November 2006; received in revised form 24 April 2007; accepted 12 September 2007

Abstract: A multi-level nested air quality modeling system was developed by coupling the meso-scale meteorological model ARPS and the community multi-scale air quality model CMAQ. The modeling system was then applied to assess the effect of emissions in the Shijingshan district on the air quality in the Beijing urban area in Jan. and Aug. 2002. The monthly average PM_{10} contribution from Shijingshan to Beijing urban area was $29.68 \mu g \cdot m^{-3}$ in Jan. and $32.09 \mu g \cdot m^{-3}$ in Aug. The daily average PM_{10} contribution was as high as $50 \mu g \cdot m^{-3}$ on highly 1 polluted days. Two air polluting processes were selected, one was in Jan. and the other was in Aug. By analyzing the two processes, a strong correlation was found between the simulated contributions and the monitoring results. The PM_{10} contribution was relatively low and went up steadily at the beginning, followed by a sharp increase of PM_{10} contributions with monitoring concentrations. The PM_{10} contribution rates were 52.89% and 44.78% in the two selected processes, respectively. At the ending stage of the pollution processes, the PM_{10} contribution fell according to the monitoring results. This suggests that the PM_{10} contribution from Shijingshan district to the Beijing urban area is large, and the quick increase of contributive concentration is one of the important reasons that the monitoring concentration rises sharply on the selected polluted days in the Beijing urban area.

Keywords: Beijing; ARPS-CMAQ coupling models; numerical simulating; pollution contribution

1 引言 (Introduction)

近年来,北京市的大气污染比较严重,成为人们关注的焦点,国内外学者从污染成因与来源 (Sun

et al., 2004)、污染分布 (于淑秋等, 2002)、区域污染影响 (苏福庆等, 2004) 等不同角度分别对这一问题进行了研究,取得了大量成果,为北京市空气质量的改善提供了科学数据. 其中,作为北京市的重工

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (No. 2005CB724201); 北京市自然科学基金项目 (No. 8061001)

Supported by the National Basic Research Program of China (No. 2005CB724201) and Natural Science Foundation of Beijing (No. 8061001)

作者简介: 赵秀勇 (1976—), 男, 博士生, E-mail: zhxiuyong@gmail.com; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: ZHAO Xiuyong (1976—), male, Ph. D. candidate, E-mail: zhxiuyong@gmail.com; * Corresponding author

业区,人们对石景山区对北京市空气质量的影响也进行了一些研究,例如,利用轨迹模式结合气象流场半定量的诊断分析了石景山区大气污染扩散对北京市区的影响(蔡旭晖等,2002),利用空气质量模式 Calpuff 模拟了石景山工业区对北京市空气质量的影响(宋宇等,2003)等.上述研究为石景山区对北京市空气质量影响的进一步研究打下了良好的基础.同时,气象模式与环境质量模式的不断改进为获取更好的相关研究成果提供了可能.本文采用中尺度气象模式 ARPS 提供气象背景场,利用第3代空气质量模式 CMAQ 定量模拟石景山区污染物排放对北京市 PM_{10} 的影响.

ARPS 是由美国 Oklahoma 大学的风暴预报中心开发,建立在可压的 Navier-Stokes 方程上的非静力大气预报模式,其最初目的是为研究预测风暴而设计的(Xue *et al.*, 2000),与 MM5 等其它气象模式相比,它在对流精细尺度系统的预报中体现出较高的性能,因此,该模式可以更好的提供北京地区高分辨率复杂地形的气象背景场(Chen *et al.*, 2005).CMAQ 是美国 EPA 开发的第3代空气质量模型,与 Calpuff 等模型比较,引入了化学机制,突破了其对单一物种模拟的限制,实现了模拟实际大气中不同物种之间的相互转换和相互影响(Byun, 1999),而且,本模式将模拟的区域分成大小不同的网格嵌套来分别模拟,外层嵌套区域模拟结果为内层嵌套提供边界条件,提高了模拟的准确度.

2 研究方法(Study methods)

2.1 模式系统设计

根据中尺度气象模型 ARPS 输出结果与空气质量模型 CMAQ 需要输入的气象数据特点,建立两模型输出与输入数据之间的转换机制,将两模型耦合.采用全球 $1^\circ \times 1^\circ$ NCEP 再分析资料为 ARPS 提供初始气象场,CMAQ 获得污染源清单数据和 ARPS 提供的气象场数据输入后,模拟北京市污染物浓度的空间分布,整个模拟区域采用三层网格嵌套,分辨率分别为 36、12 和 4km,外层嵌套为内层提供边界条件.其中外层嵌套只模拟气象背景场,模拟范围包括中国的中东部以及蒙古、朝鲜、韩国等区域;中间层模拟区域为我国华北地区,在气象背景场模拟的基础上,利用 CMAQ 模拟该区域的空气质量;内层模拟区域为北京市(图1),利用该层空气质量模拟数据分析石景山区污染物排放对北京市 PM_{10}

浓度的影响.

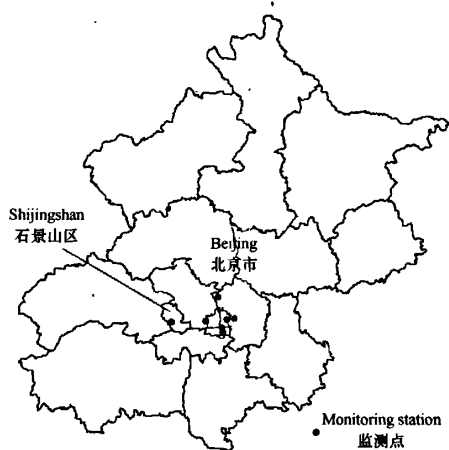


图1 内层模拟区域与监测点位置示意图

Fig. 1 The inner simulation area and monitoring stations

2.2 污染源清单

根据模拟需要,本研究建立了中间层和内层模拟区域的污染源清单.其中中间层清单研究区域包括北京市、河北省、山西省、内蒙古自治区(华北部分)、山东省(中西部)、天津市以及辽宁省(西南部分),污染物包括 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 、VOCs 等.本层研究区域的污染源活动水平基础数据收集到区县一级,基准年为 2002 年.

内层研究区域为北京市,本研究通过对全市活动水平在基准年时空变化情况的调查,建立了较详细的污染源清单.点源(烟囱高度大于 45m 的污染源)全部具有精确的经纬度坐标以及烟气排放参数和时间不均匀系数,面源基础数据以乡镇街道为统计单位调查、收集.污染物也比较全面,包括 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 、VOCs、 NH_3 、CO 等,污染源种类包括工业点源、工业面源、锅炉点源、锅炉面源、居民面源、道路扬尘、交通排放、施工扬尘、农田排放等.其中,石景山区各类污染源 PM_{10} 排放量共计 1.76 万 $t \cdot a^{-1}$,约占全市 PM_{10} 排放总量的 10.17%.

根据不同空间分辨率要求,利用 GIS 技术对上述中间层、内层的面源和点源污染源数据分别进行空间网格化处理,建立 CMAQ 模拟需要的标准格式污染源清单.

2.3 模拟方案设计

本研究定义北京市城八区内车公庄、古城、前门、农展馆、天坛、东四、奥体等 7 个大气环境监测国控点(图1)的 PM_{10} 平均浓度为北京市 PM_{10} 浓度.在

内层模拟区域分别设计 2002 年北京现状排放和排放清单中石景山区零排放两种模拟方案,并选取上述 7 个国控点两种不同方案模拟结果的平均差值,代表石景山区污染物排放对北京市污染的贡献浓度,通过对贡献浓度的特征分析研究石景山区对北京市空气质量的影响。

3 模式系统验证 (Assessment of the models system)

对模式模拟的 2002 年 1、8 两个代表月北京市空气质量结果的有效性进行验证,将上述 7 个国控点 2002 年两个月份的日均 PM_{10} 模拟值与监测值之间的散点图进行对比分析,从整体评估模式系统的准确程度(图 2、图 3)。

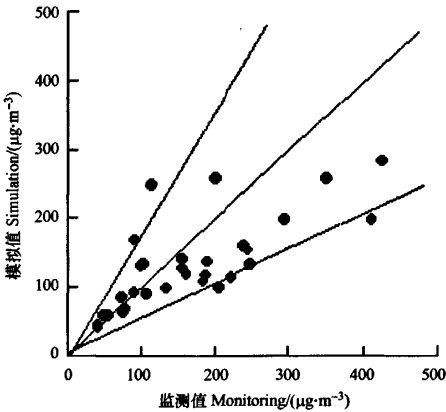


图 2 1 月份 PM_{10} 日均模拟浓度与监测浓度对比

Fig. 2 Comparison of daily average of simulation and monitoring PM_{10} concentration in Jan

由图 2、图 3 可以看出,1、8 月份 PM_{10} 日均模拟值与监测值对应效果较好,其中 1 月份 80% 以上的

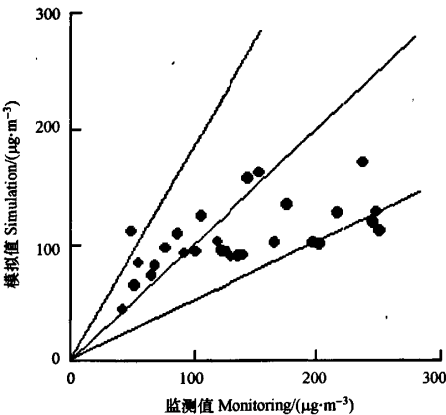


图 3 8 月份 PM_{10} 日均模拟浓度与监测浓度对比

Fig. 3 Comparison of daily average of simulation and monitoring PM_{10} concentration in Aug

点都落在有效区之内,8 月份也有 85% 以上的点落在其有效区之内,说明模式模拟结果具有较高的有效性和可信性.因此,可认为本文选取的模式和设计的方案对北京市 PM_{10} 的污染状况模拟是可行的,模式模拟结果可以有效反映北京市空气质量现状及其变化情况。

4 模拟结果 (Simulations)

ARPS-CMAQ 耦合模型模拟结果显示,2002 年 1 月份和 8 月份石景山区污染物排放对北京市 PM_{10} 浓度贡献分别为 $29.68 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $32.09 \mu g \cdot m^{-3}$,贡献率分别为 19.73% 和 24.61%。石景山区 2002 年 1 月份和 8 月份逐时贡献浓度模拟结果及其与监测浓度对比情况见图 4 和图 5(图中横坐标每 36h 给出一次时间标示)。

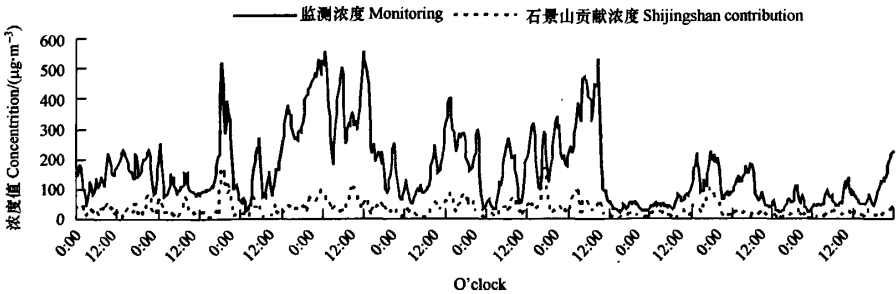


图 4 2002 年 1 月石景山区污染物逐时贡献 PM_{10} 浓度与监测浓度对比图

Fig. 4 Comparison of Shijingshan hourly contribution and monitoring PM_{10} concentration in Jan. 2002

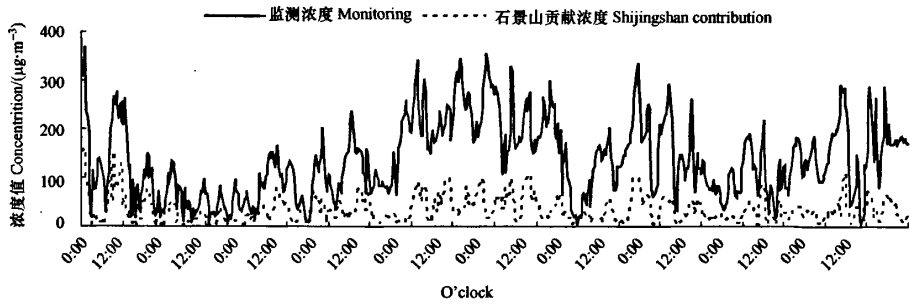


图 5 2002 年 8 月石景山区污染物逐时贡献 PM_{10} 浓度与监测浓度对比图

Fig. 5 Comparison of Shijingshan hourly contribution and monitoring PM_{10} concentration in Aug. 2002

5 结果分析 (Analysis of simulations)

5.1 污染影响分析

从图 4、图 5 可以看出石景山区冬夏两季 PM_{10} 逐时贡献浓度与监测浓度对比具有较好的位相关性,贡献值随着监测值的变化而相应变化,特别是在污染较重的时段其贡献浓度也相应增大.表 1 给出了 1 月和 8 月的较重污染日期的监测浓度值与石景山区的 PM_{10} 贡献浓度值的对比情况.

从表 1 可以看出,在选出的代表月的污染较重日期,石景山区的日均污染贡献浓度均在 $50\mu g\cdot m^{-3}$ 左右,是国家二级空气质量标准日均值的 1/3,同时也是各自日均贡献浓度的 1.41 ~ 1.95 倍.据统计,在 1 月 6 日监测浓度较大的 6:00 至 16:00 期间,其平均贡献浓度更是达到了 $110.55\mu g\cdot m^{-3}$,这充分说明,北京市的空气污染过程受石景山区的污染物排放影响较大.下面通过典型污染过程的贡献浓度变化情况进一步分析了其对北京市空气污染的影响.

表 1 1 月、8 月较重污染日期日均 PM_{10} 监测浓度与石景山区贡献浓度对比表

Table 1 Comparison of daily average Shijingshan contribution and monitoring PM_{10} concentration on pollution days in January and August $\mu g\cdot m^{-3}$

污染时间	日均贡献浓度	日均监测浓度
1 月 6 日	57.91	235.94
1 月 9 日	53.03	413.44
1 月 10 日	41.90	374.33
1 月 11 日	51.76	357.15
1 月 18 日	52.88	223.57
1 月 19 日	51.87	360.71
8 月 14 日	51.37	251.86
8 月 15 日	47.15	256.31
8 月 17 日	51.34	211.90
8 月 21 日	49.94	193.91

5.2 典型污染过程分析

5.2.1 1 月污染过程影响分析 图 6 为基准年 1 月 6 日 PM_{10} 逐时监测浓度与石景山区贡献浓度对

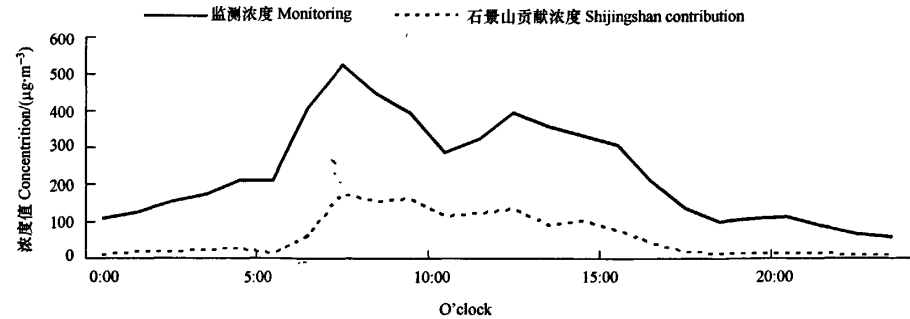


图 6 2002 年 1 月 6 日 0 时到 23 时 PM_{10} 监测浓度与石景山区贡献浓度逐时变化图

Fig. 6 Shijingshan hourly contribution and monitoring PM_{10} concentration on 01-06-2002

比图,从图中变化趋势不难看出监测浓度与石景山区贡献浓度值的变化具有较好的一致性。同时,从数值分析来看,5:00 时监测值浓度已高于 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,但增长缓慢,贡献浓度也较低,但 5:00 时之后,污染物浓度贡献值与监测值同步迅速上升达到峰值,其中监测浓度值在 2h 内增加了 $309.43 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,贡献浓度值增加了 $163.66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,即监测值增量中的 52.89% 是由于石景山地区的污染物排放贡献的。这充分说明,本次 PM_{10} 污染过程中高污染浓度的出现与石景山区污染物排放对北京市空气污染的较大贡献有直接关系。峰值过后监测浓度与贡献浓度同步缓慢下降。

5.2.2 8 月污染过程影响分析 所选污染过程发生在 8 月 20 日下午至 21 日下午,持续时间约 1d, PM_{10} 平均监测浓度 $223.39 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,石景山区污染物排放对监测值的平均贡献浓度 $57.61 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。从图

7 可以看出本次污染过程中石景山区污染物贡献 PM_{10} 浓度与监测浓度的变化趋势较为一致,且均在 21 日清晨出现大的波峰。北京市小时平均 PM_{10} 监测值于 20 日 18:00 开始超过 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,并缓慢上升,此时石景山贡献值较低,21:00 受石景山和其它区域共同污染的影响,污染物浓度开始迅速升高,至 21 日 4:00 监测值浓度达到最大值 $337.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,石景山区污染物贡献浓度也达到峰值 $99.62 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,在该时段贡献浓度的增值 $73.50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 占到监测浓度增值 $164.14 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 44.78%。以上分析说明,虽然本次污染最初的出现与石景山区污染物排放关系不大,但是,之后石景山区贡献浓度的迅速增长却是监测浓度的急速升高的一个重要原因,这进一步加重了北京市的空气污染。

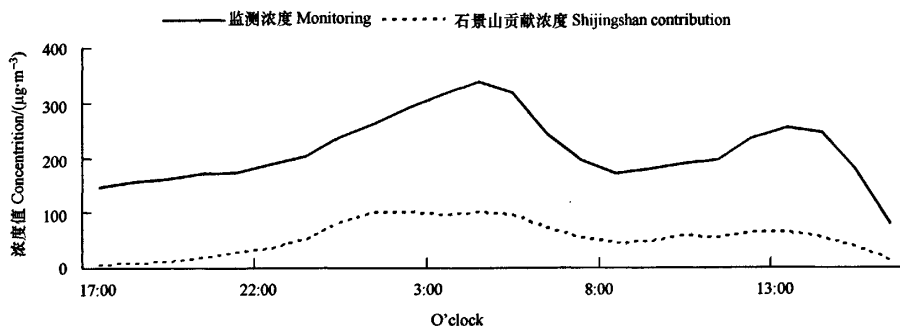


图 7 2002 年 8 月 20 日 17 时到 21 日 16 时 PM_{10} 监测浓度与石景山区贡献浓度逐时变化图

Fig. 7 Shijingshan hourly contribution and monitoring PM_{10} concentration from 08-20-2002 to 08-21-2002

6 结论 (Conclusions)

1) 2002 年 1 月、8 月两个月份石景山区污染物排放对北京市 PM_{10} 污染的月均贡献浓度分别为 $29.68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $32.09 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中污染较重日的日均贡献浓度在 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,说明石景山污染对北京市这两个月份空气质量的影响较大。

2) 在所选 1 月和 8 月典型污染过程中石景山污染贡献浓度与监测浓度变化趋势较为一致,分析结果表明,贡献浓度短时间内的迅速增加是导致这两个污染过程中北京市 PM_{10} 监测浓度骤然升高的一个重要原因,特别是在峰值出现前的几小时内其增值分别达到 $163.66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $73.50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,占同期监测值浓度增值的 52.89% 和 44.78%。

责任作者简介:程水源 (1958 -),男,教授,博士生导师。研究方向:大气污染数值模拟与控制规划。E-mail:chengsy@bjut.edu.cn, Tel:010-67391656。

References

- Byun D. 1999. Dynamically consistent formulations in meteorological and air quality models: Part I. Governing equations in a generalized coordinate system [J]. *Journal of Atmospheric Science*, 56: 3787—3807
- Cai X H, Guo Y, Chen J Y, et al. 2002. Semi-quantitative Analysis of Air Pollution Impact from Shijingshan Industrial District in Beijing [J]. *Environment Science*, 23 (suppl.): 48—53 (in Chinese)
- Chen D S, Cheng S Y, Guo X R, et al. 2005. An integrated ARPS-MM5-CMAQ modeling approach for predicting PM_{10} concentration in the metropolitan region of Beijing in winter [J]. *Environmental Informatics Archives*, (3): 439—448
- Song Y, Chen J Y, Cai X H. 2002. The Model ing of PM_{10} Contribution

- to Beijing by the Shijingshan Industrial Area [J]. *Environment Science*, 23(suppl): 65—68 (in Chinese)
- Su F Q, Ren Z H, Gao Q X, *et al.* 2004. Convergence System of Air Contamination in Boundary Layer above Beijing and North China: Transportation Convergence in Boundary Layer [J]. *Research of Environmental Sciences*, 17(1): 21—26 (in Chinese)
- Sun Y L, Zhuang G S, Han L H, *et al.* 2004. The air-borne particulate pollution in Beijing—concentration, composition, distribution and sources [J]. *Atmospheric Environment*, 38: 5991—6004
- Xue M, Droegemeier K K, Wong V. 2000. The Advanced Regional Prediction System (ARPS)-A multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part I: Model dynamics and verification [J]. *Meteor Atmos Physics*, 75: 161—193
- Yu S Q, Lin X C, Xu X D. 2002. Temporal and spatial characteristics of air pollution in Beijing [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 13(suppl): 92—99 (in Chinese)
- 中文参考文献:
- 蔡旭晖, 郭昱, 陈家宜, 等. 2002. 北京石景山区大气污染扩散对市区影响的半定量分析 [J]. *环境科学*, 23(增刊): 48—53
- 宋宇, 陈家宜, 蔡旭晖. 2002. 石景山工业区 PM₁₀ 污染对北京市影响的模拟计算 [J]. *环境科学*, 23(增刊): 65—68
- 苏福庆, 任阵海, 高庆先, 等. 2004. 北京及华北平原边界层大气中污染物的汇聚系统 [J]. *环境科学研究*, 17(1): 21—26
- 于淑秋, 林学椿, 徐祥德. 2002. 北京市区大气污染的时空特征 [J]. *应用气象学报*, 13(增刊): 92—99