

天津市空气污染数值预报 实验中的模式系统*

张美根 韩志伟 雷孝恩

(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

佟彦超

(中国环境监测总站, 北京 100029)

摘要 介绍了天津市空气污染数值预报实验中城市空气污染数值预报模式系统的构成及各模块的功能。在天津市空气污染预报实验期间, α 中尺度气象模式对区域范围内的逐时风、温、湿及其降水预报取得了较好的效果, 且模式的计算时间短; β 中尺度气象模式在边界层内具有较高的垂直分辨率, 模拟结果合理, 其中计算与观测的风向差小于 60° 的概率达到 64.3%, 计算与观测的风速比值接近于 1; 预报的地面 SO_2 、 NO_x 和 TSP 浓度与同步监测值相比, 城市空气污染预报模式对 SO_2 和 NO_x 的日平均浓度的预报效果较好, 预报准确率达 64.0%, 而对 TSP 的预报则较差。

关键词 城市空气污染预报 大气扩散 干沉积

1 引言

我国许多城市的二氧化硫 (SO_2) 和总悬浮颗粒物 (TSP) 浓度严重超标, 有些城市的汽车尾气污染也相当严重。这给城市居民的身体健康和生存环境等方面造成了很大的危害。大量的空气污染监测和大气扩散实验证明, 城市大气是否会发生污染以及污染的浓度和分布如何, 一方面取决于污染源的多寡、性质和排放强度, 另一方面还要根据当时当地的气象条件而定。气象条件对大气污染物所产生的重大影响表现在许多方面, 其中主要为: 大气对污染物的稀释扩散能力随着气象条件的改变而发生巨大的变化; 气象条件对大气污染物的物理和化学过程有显著的影响和大气状况对污染源本身的影响等等。

与天气预报相比, 城市空气污染预报有着许多独有的特征^[1,2]: (1) 空间尺度和预报时效。城市空气污染预报的空间尺度一般小于 200 km (按 Orlanski^[3] 的划分标准, 属 β 中尺度), 但天气条件受区域尺度天气系统的影响和污染物受湍流的影响, 因此在进行空气污染预报时既要考虑大中小尺度之间的相互耦合、宏观和微观的理化生过程, 以满足浓度预报的精度, 但又不能使预报模式系统太复杂, 有些过程如小尺度湍流、化学转化等过程必须简化或参数化, 以保证预报时效。(2) 时空分辨率。城市空气污染预报

1999-05-10 收到

* 中国科学院“九五”重大A项目KZ951-A1-403资助

系统涉及到的污染物、热量、水汽、辐射及其通量的大部分来源于行星边界层 (PBL) 下层, 这些量在 PBL 内的垂直切变非常明显, 而且呈多极值或多中心分布, 并且大气稳定度参数变化最激烈的区域也在 PBL 下层, 因此模式系统在 PBL 内必须具有较高的垂直分辨率。另外, 如何反映城市功能区的污染源结构和下垫面非均匀性的影响也是预报成功与否的关键, 因此模式系统在水平方向具有较高分辨率也是十分必要的。大气稳定度的预报要求温度具有较高的精度, 而温度与大气辐射有密切的关系, 具有明显的日变化, 所以模式系统应该具有较高的时间分辨率。(3) 城市气象条件。在城市中由于人口密集, 道路和建筑物的鳞次栉比, 参差不齐, 形成特殊性质的下垫面。非均匀的下垫面造成动力学粗糙度增大 (粗糙度长度在 1~3 m 之间), 使得城区风速减小、气流不规则和湍流混合加强, 在一些大面积高建筑物的后面形成尾流区, 造成污染物的高浓度积累。另外, 加上城市居民的生活和生产活动大量消耗能源, 产生愈来愈多的人为热、温室气体和人为水汽, 引起城市热岛。在热岛环流的作用下形成城市特有的混合层熏烟现象, 并有可能使城区形成地面高浓度。

按预报内容划分, 城市空气污染数值预报模式系统包括城市尺度的天气预报模式和污染物浓度预报模式两部分。考虑到现有的计算能力和资料状况, 在天津市空气污染实验中的模式系统由 α 中尺度气象模式、 β 中尺度气象模式、城市空气污染预报模式和预报结果检验几个模块组成 (模式系统的流程图见图 1)。预报结果检验是模式系统中一个重要的组成部分, 它可以 4 个方面对模式系统的性能进行评价, 即模式预报的污染物浓度和大气质量的可比性、模式预报污染物浓度的时空分布及其分布形式、模式预报结果与实测值接近程度和模式假设的实用性和合理性。

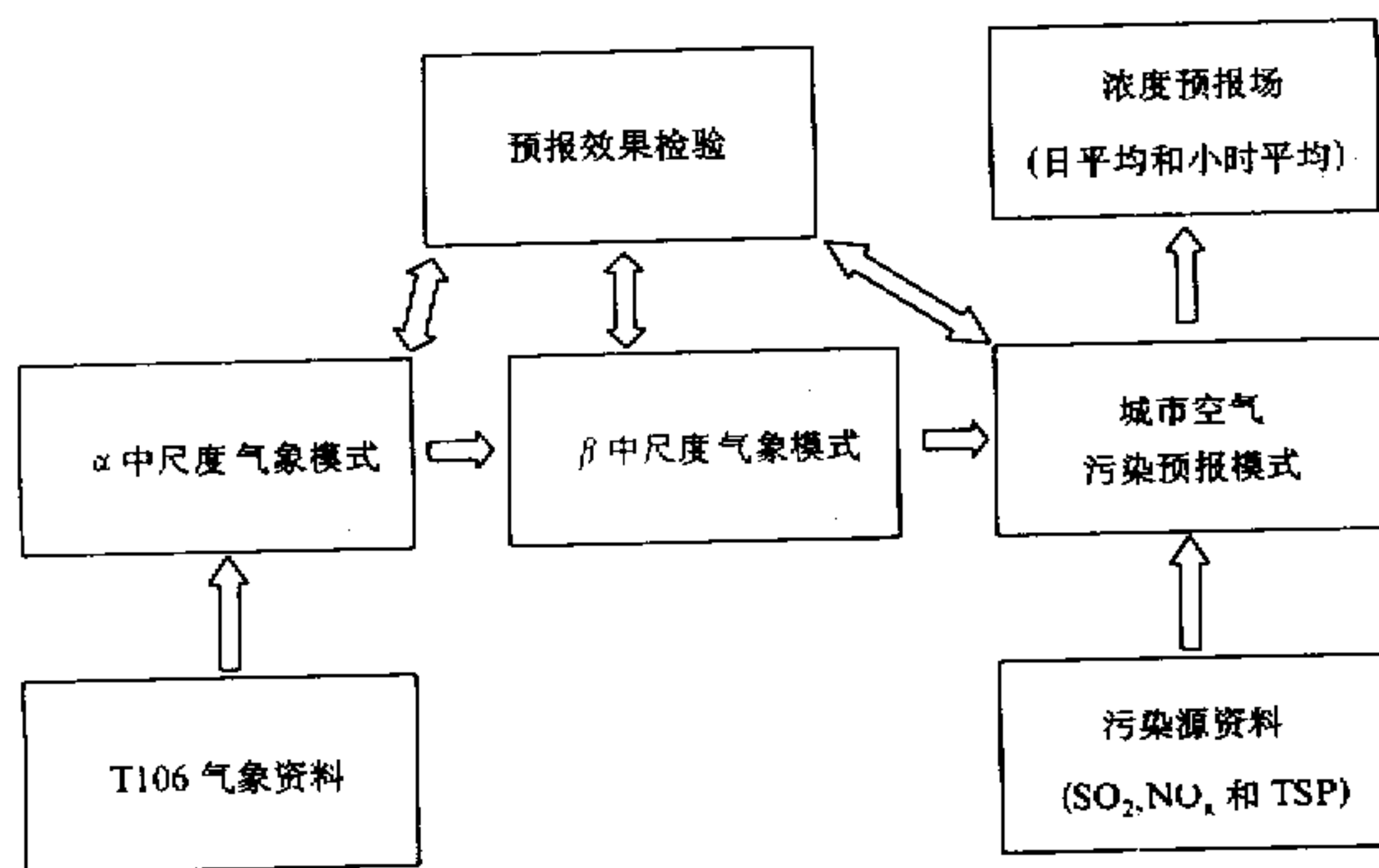


图 1 城市空气污染预报模式系统流程图

2 α 中尺度气象模式

α 中尺度气象模式为宇如聪^[4]设计的考虑陡峭地形的有限区域数值预报模式, 在城

市空气污染数值预报模式系统中用来预报区域尺度的风向、风速、温度、降水及地温, 为 β 中尺度气象模式提供气象要素的初始场和同化场。

为考虑陡峭地形, 模式的垂直坐标选用 η 坐标。 η 坐标保留了 σ 坐标具有的简单下边界条件的特点, 同时避免了 σ 坐标在陡峭地形情况下 σ 等值面过于倾斜造成的气压梯度力计算不准确的缺点。模式在物理过程处理上考虑了对短期天气过程有重要意义的物理过程, 其中主要有: (1) 大尺度凝结降水, (2) 对流调整及对流降水, (3) 水平扩散和垂直通量输送, (4) 地面辐射收支和边界层参数化。

该模式在许多业务和研究部门得到了应用, 曾成功的模拟了青藏高原背风气旋的发生发展、“75.8”局地大暴雨和著名的“雅安天漏”^[4]等。

在天津空气污染预报实验中, 该模式的水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的经纬格点 (实际分辨率约为 $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$)。在垂直方向上, 模式顶取为 100 hPa (即只考虑对流层), 从海平面到模式层顶按 η 坐标值等分为 13 层。

3 β 中尺度气象模式

β 中尺度气象模式为流体静力原始方程模式¹⁾。在城市空气污染数值预报模式系统中, 该模式用以详细描述边界层结构和气象要素的分布, 为城市空气污染预报模式提供高分辨率的气象要素场。

该模式采用了地形追随坐标系和四维资料同化技术, 在边界层内具有很高的垂直分辨率。在理论和实际模拟研究中发现, 模式能较为全面地反映天气系统和下垫面非均匀性对气象要素的影响, 较好地模拟了山谷风、海陆风、河陆风、城市热岛等局地环流的基本特征^[5]。

模式的差分格式采用交错网格, 其中在垂直方向, 除了垂直速度定义在整位面上以外, 其它变量定义在半位面上。在天津空气污染预报实验中, 模式高度为 5000 m, 分为 12 层 (各层高度见表 1), 水平网格距为 2500 m。

表 1 模式的垂直分层

层 次	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
整位面	0	14	36	64	86	114	286	714	786	1214	1786	4214	5786
半位面	0	7	25	50	75	100	200	500	750	1000	1500	3000	5000 /

理论和观测表明, PBL 下层与 PBL 上层和自由对流层下层的湍流发生机制是不一样的。PBL 下层的湍流主要由机械和热力引起的, 具有连续性特征, 而 PBL 上层和自由对流层下层的湍流主要由风切变引起的, 具有很大的间隙性。通过对 4 类垂直扩散系数参数化方案的比较^[6], 用于天津污染预报实验的 PBL 内的垂直动量涡旋扩散系数取为

$$K_z = T_{L,w} \sigma_w^2, \quad (1)$$

式中, $T_{L,w}$ 和 σ_w 为垂直方向的拉格朗日时间尺度和湍流脉动速度标准差^[7], 是大气稳

1) 中国科学院大气物理研究所, 1996, 岭澳核电站与大亚湾核电站场址大气相关性研究, pp.279

定度和高度的函数。

在 PBL 以上的对流层内, 垂直动量涡旋扩散系数采用 MM4^[8]的参数化方案:

$$K_z = \begin{cases} K_0 + L_0^2 S^{1/2} \frac{Ri_c - Ri_b}{Ri_c}, & Ri_b < Ri_c, \\ K_0 & Ri_b \geq Ri_c, \end{cases} \quad (2)$$

其中, $Ri_b = (g\Delta\theta_v \Delta z) / \{\theta_v [(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2]\}$ 为总体 Richardson 数, $Ri_c = 0.257 \Delta z^{0.175}$ 为临界 Richardson 数, $K_0 = 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$, $L_0 = 0.36z / (1 + 0.36z)$ 为混合长, $S = (\partial u / \partial z)^2 + (\partial v / \partial z)^2$ 。

在中尺度模式中常常忽略水平涡旋扩散的贡献, 其原因有二: 一是与水平平流相比, 水平扩散的作用小; 二是解平流项时的数值扩散往往大于大气中的实际扩散。考虑到 PBL 下层机械和热力作用产生的小尺度湍流的贡献, PBL 内水平动量涡旋扩散系数取为^[6]

$$K_x = K_y = T_{L,u} \sigma_u^2, \quad (3)$$

式中, $T_{L,u}$ 和 σ_u 为水平方向的拉格朗日时间尺度和湍流脉动速度标准差^[7], 是大气稳定性和高度的函数。在 PBL 以上的对流层内, 水平动量涡旋扩散系数用以下关系式^[9]:

$$K_x = K_y = C_0 \Delta x \Delta y \left(\left| \frac{\partial u}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial v}{\partial y} \right| \right), \quad (4)$$

式中, 常数 $C_0 = 0.01$ 。

根据经验理论, 热量或水汽涡旋扩散系数与动量涡旋扩散系数成比例关系, 从而得到热量涡旋扩散系数的参数化方案。

4 城市空气污染预报模式

城市空气污染预报模式是在美国区域酸沉降模式 (RADM)^[10]的基础上建立并发展起来的, 是一个包括输送、扩散、迁移和转化过程的欧拉型物质模式^[9], 在城市空气污染数值预报模式系统中用来预报逐时 SO_2 、 NO_x 和 TSP 的时空分布。

模式的适用性很广, 可用于复杂地形、多种气象条件、多排放源、多种污染物的地区, 与 β 中尺度污染气象预报模式结合, 可以很好地预报城市空气污染物的分布及变化趋势。

在天津空气污染预报实验中, 模式顶高度为 5000 m, 分为 12 层 (各层高度见表 2), 水平区域 $150 \text{ km} \times 75 \text{ km}$, 网格距为 2500 m。在垂直方向采用不等距网格是希望在保持计算速度的前提下能在 PBL 内有较高的分辨率。

表 2 模式的垂直分层

层次	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
高度	0	7	25	50	75	100	200	500	750	1000	1500	3000	5000
σ	1.0	0.998	0.994	0.988	0.981	0.975	0.951	0.879	0.821	0.764	0.654	0.354	0.000

4.1 输送过程

大气的运动状况是决定污染物扩散稀释的直接因素, 由于风的整体输送作用, 在污染源的下风方向污染物的浓度要比其它方向高得多。在物质守恒方程中, 污染物的输送过程是通过平流项来表征的, 该项对污染物的分布有很重要的影响。在城市尺度空气污染预报模式中平流项的差分采用了 Prather 二阶矩守恒格式。数值实验证明, 采用 Prather 格式能减小数值扩散, 模拟的污染物质量中心更符合实际。

4.2 扩散过程

污染物在大气中的扩散是由湍流引起的。湍流的发生、发展与大气条件、下垫面特征、太阳日照等密切相关, 但受模式分辨率的限制, 只能对湍流进行参数化。关于湍流扩散系数参数化的方案很多, 本模式涡旋扩散系数参数化采用关系式 (1) ~ (4)。

4.3 迁移过程

污染物释放到大气中后, 除了随大气的运动而被输送和扩散以外, 大气污染物会通过干湿沉降两种途径沉积到地面。中尺度范围大气环境质量研究发现, 由土壤、森林、建筑物和水体等不同下垫面界面上吸收引起的干沉积过程是物质迁移到地表面的主要控制因子, 是 PBL 中很多污染物的汇。影响干沉积速度的因子有很多, 根据对近地面层和植物冠层中物质的湍流交换与输送、冠层内物质和动量的吸收、地表面上的溶解 (吸收或反射) 以及大气稳定度等对沉积过程影响的数值研究, 雷孝恩^[11]提出了较为完善的干沉积速度表达式。

4.4 转化过程

污染物在大气中发生的化学反应是非常复杂的。模式中气相化学反应机制是由 23 种化学反应物质的浓度按时间显式积分导出, 有 9 种物质是在假设存在化学平稳态情况下在每个网格点上求解代表方程组。

5 天津市空气污染预报实验总结

在中国环境监测总站的支助和协调下, 中国科学院大气物理研究所联合天津市环境监测站和天津市气象科学研究所, 连续 15 天对天津市的 SO_2 、 NO_x 和 TSP 浓度的时空分布进行了 24 小时预报, 并将预报的气象因子和污染物浓度与相应的观测值进行了比较。通过对城市空气污染预报模式系统的设计、调试以及天津市空气污染预报实验结果的综合分析, 得到如下结论:

用 α 中尺度气象模式对区域范围内逐时的风、温、湿及降水进行了 15 天的预报, 获得了较好的效果。模式的优点是计算时间短, 能满足预报时效的要求, 对风向和降水预报较好, 但用于城市空气污染预报时, 还需在以下 3 点开展进一步研究: (1) 提高垂直分辨率, 做到 150 m 以下有两层; (2) 提高大风条件下的预报精度, 因为大风时预报的风速小于实际风速 2 倍以上; (3) 需要对模式进行调试和参数调整, 因为预报的一天中温度变化趋势不符合实际。

总的来说, 由 β 中尺度气象模式预报的 15 天的地面风场比较合理。与天津市 9 个气象观测站的观测相比, 风向偏差小于 60° 的个例达 64.3%, 预报与实测风速比值的平均值接近 1, 但其标准差偏大。

预报 15 天的地面 SO_2 、 NO_x 和 TSP 浓度与天津市同步监测浓度相比, 城市空气污染预报模式对 SO_2 和 NO_x 日均浓度值的预报效果较好, 预报准确率可达 64%, 但对 TSP 的预报相对较差。另外, 市区污染物浓度日变化的预报值与观测值的差异也较大。

模式预报的结果与污染源密切相关, 需进一步加强对污染源的调查和统计, 使模式采用的污染源尽可能地符合实际情况, 如尘的污染源、交通源及其变化规律等, 同时需提高监测数据的质量, 使监测结果尽量准确和合理。

致谢 天津市空气污染预报实验是在中国环境监测总站站长万本太先生的关怀下完成的, 参加实验的人员还有中国科学院大气物理研究所的袁素珍、邓玉珍、陶树旺、贾新媛、赵思雄和陈红、天津市环境监测站的秦保平、邵莹、王颖、张裕芬、刘彩霞和于洋以及天津市气象科学研究所的谢以扬、王长有和朱玉强, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 雷孝恩、张美根、韩志伟等, 1998, 大气污染数值预报基础和模式, 北京: 气象出版社。
- 2 周淑贞、束炯, 1994, 城市气候学, 北京: 气象出版社。
- 3 Orlanski, I., 1975, A rational subdivision of scales for atmospheric processes, *Bull. Am. Met. Soc.*, **56**, 527~530.
- 4 Yu Rucong, 1994, Documentation of the LASG Regional Eta-Coordinate Model, Technical Report No. 1.
- 5 韩志伟, 1997, 中尺度局地环流和化学物质演变的数值研究, 中国科学院大气物理研究所硕士研究生学位论文。
- 6 雷孝恩、张时禹, 1992, 对流层物质垂直交换模式中的参数化处理, *大气科学*, **16**, 737~747.
- 7 雷孝恩, 1990, 行星边界层中湍流统计量和风速随高度变化的参数化, 中国科学院大气物理研究所集刊, 第 14 号, 北京: 科学出版社, 1~18.
- 8 Anthes, R. A., E. Y. Hsie and Kuo Y.H., 1987, Description of the Penn State / NCAR Mesoscale Model Version 4 (MM4), NCAR / TN-282+STR, 1-66.
- 9 Lei X. E. and J.S. Chang, 1992, A high resolution model for chemical species exchange in troposphere, *Acta Meteorologica Sinica*, **6**, 479~490.
- 10 ADMP, 1987, Development and Implementation of Chemical Mechanisms for the Regional Deposition Model (RADM), AOMP, NCAR, Boulder, Colorado, 1~164.
- 11 Lei Xiaoen, 1996, A new dry deposition velocity pattern and its practical application in high resolution regional acid deposition model, *Acta Meteorologica Sinica*, **10**(1), 116~128.

Modeling System Applied to Tianjing Air Pollution Forecasting Experiment

Zhang Meigen, Han Zhiwei and Lei Xiaoen

*(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Physics and Atmospheric Chemistry,
Chinese Academy of Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Beijing 100029)*

Tong Yanchao

(China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100029)

Abstract the structure of Modeling System for Urban Air Pollution Forecasting, applied to Tianjing air pollution forecasting experiment and the function of each module were introduced briefly. Results of this experiment showed that, (1) Meteorological Model of meso- α scale has high efficiency and can predict hourly averaged wind, temperature, moisture and precipitation quite well on regional scale. (2) Meteorological Model of meso- β scale has high resolution in PBL and its simulated results were reasonable. Probability of deviation of simulated wind direction from observed one, less than 60° , was 64.3%. Average ratio of simulated wind velocity and observed one was close to 1. (3) By comparing predicted ground concentrations of SO_2 , NO_x and TSP with simultaneous observed ones Urban Air Pollution Forecasting Model predicted daily averaged concentrations of SO_2 and NO_x more satisfactorily than that of TSP, and prediction accuracy of SO_2 and NO_x was up to 64.0%.

Key words urban air pollution forecast atmospheric dispersion dry deposition