

大气污染预测的理论和研究方法研究进展

洪钟祥 胡 非

(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)

摘 要 介绍中国科学院“九五”重大科研项目“大气污染预测的理论和研究方法研究”的研究意义、目标和具体的研究内容, 同时对已取得的重要研究进展和阶段性成果作简要介绍。

关键词 大气污染预报 大气污染动力学 大气污染模式

1 引言

随着我国工业、交通和建筑业的蓬勃发展, 以二氧化碳、氮氧化物和颗粒物为主的大气污染问题也日趋严重, 已经成为我国政府和社会共同面临的严峻问题。以北京为例, 1993 年就曾因空气质量问题影响了主办奥运会的申请, 1997 年全年污染物严重超标高达 90 多天, 而 1998 年的空气质量周报表明, 北京市的大气环境还在进一步恶化。其它大城市的情况也同样令人深感忧虑, 如此下去, 发生像 50 年代英国伦敦那样的重大污染事件的可能性是很大的。

空气污染给农业、林业、建筑物(包括历史文物)以及天气和气候等造成严重的影响。我国仅酸雨一项每年导致经济损失就达数百亿元, 而因污染损害人体健康和损坏历史文物的价值更是无法估量, 环境污染还可能引起国际纠纷。

因此, 迅速开展大气污染及其影响的预测和优化控制研究, 是摆在大气科学工作者面前的紧迫任务。1997 年上半年, 经专家充分论证, 作为前瞻性应用基础和社会公益性研究, 中国科学院将“大气污染预测的理论和研究方法研究”列为“九五”期间的重大科研项目。该项目的设立旨在认识大气污染扩散等过程的规律并进而运用数值预报的方法预测污染物浓度的时空分布。

国际上较早开展空气污染预报研究的国家有美国、英国、日本、荷兰、前苏联等。60 年代和 70 年代大都采用潜势预报方法即预报污染的气象条件, 不能给出污染物浓度的定量结果。进入 80 年代以后, 国际上开始致力于定量的污染浓度预报, 包括统计预报和数值预报。如韩国、墨西哥及我国台湾和香港地区均采用统计预报; 而美国、荷兰和日本等国则采用数值预报模式。但至今仍停留在研究阶段, 正式做日常业务预报的十分少见。当前国际上的发展趋势是采用先进的、科学上更严格、更定量的数值预报方法。

1999-05-10 收到

* 中国科学院“九五”重大A项目KZ951-A1-403资助

2 研究目标和内容

“大气污染预测的理论和方法研究”项目的研究目标是：研究大气污染的基本规律，包括动力学、物理学和化学过程，研制并建立大气污染预测模式系统，为我国重点城市和区域大气污染业务预报提供理论和方法。研究内容主要有以下 4 个方面。

2.1 大气污染动力学研究

研究污染物在大气中的输送、扩散、化学转化和干湿迁移过程及其相互作用的基本规律，包括污染物在大气中的湍流扩散过程及其参数化，污染物的干湿沉降过程及其参数化，大气中非均相化学过程及其参数化，扬尘和扬沙机制及其参数化等。

2.2 大气污染的气象条件研究

研究造成大气污染和严重污染事件的气象背景，特别是中尺度污染气象问题及大气边界层结构问题，研究空气污染与气象条件之间的关系与基本规律。

2.3 大气污染预测模式研究

为了进行大气污染预测，首先要预报所关心地区的三维风、温和降水场，提供实时的大气环境参数。值得指出的是，目前天气预报模式尚不能直接引用，为了得到影响污染物在大气中运动和转化的准确的气象背景，还需要在模式的水平和垂直分辨率以及资料的时空同化方面加以改进和完善，特别是中尺度气象模式的改造以及精细边界层模式与降水模式的引用。

具体预报对象是 SO_2 、 NO_x 、TSP 以及 O_3 和 CO 等，预报时效以短期（24~48 h）为主。

本研究工作的关键问题和难点是污染物输送扩散过程中所发生的非线性物理、化学过程；造成严重污染的主要气象条件；高分辨的中尺度气象模式和大气边界层模式；科学性和实用性有机结合的城市和区域大气污染预报模式。

2.4 大气污染预测实验研究

为了验证和改进大气污染预测方法、理论与模式，提高模式的可信度，积累实际大气污染预报的经验，必须采取边研究边预报实验的技术路线。这项工作包括污染源资料的调查、地形和下垫面特性的调查、预报结果与实测结果的比较、污染控制与规划理论研究以及预报演示系统研制等。

3 研究进展及成果

3.1 大气污染动力学研究

(1) 建立了一个气相化学与液相化学相结合的箱体模式 (Box Model)，研究云层及云中微结构对 O_3 的影响。模式模拟结果表明，云对 O_3 浓度影响的相对重要性分别为：云层的辐射效应占 34.1%，液相化学效应占 18.6%，吸收效应占 3.3%。

(2) 建立了云物理模式与云化学模式相结合的三维云物理化学模式，研究了云对 SO_2 、 NO_x 和 O_3 等化学物种的纯动力学输送作用，指出云中垂直气流作用，既可使高浓度的平流层 O_3 向下输送到对流层甚至近地层，也可使近地层高浓度的 NO_x 和 SO_2

向上输送到对流层上部乃至平流层。

(3) 开展了东亚地区春季沙尘气溶胶对硫化物输送和沉降影响的研究。结果表明, SO_2 和 SO_4^{2-} 的大值区主要出现在我国东部地区, 在模拟时段内, 日本地区火山源的排放对该地区大气中硫分布的贡献达 10%~30%, 并与当时飞机的观测结果相吻合。同时还分析研究了模拟区内 SO_2 和 SO_4^{2-} 的收支情况, 指出在硫的总排放量中, 从东边界面流出去的输送通量最大, 主要出现在 30~40°N 带的 2~6 km 高度上, 这与该地区最大人为排放源所在地相一致。

(4) 用量纲分析的方法分析了控制大气中污染物输送方程的动力学特性以及相关的各种物理化学过程的相对重要性。引入了表征动力、物理和化学过程重要性的 6 个特征参数, 并选择硫元素作为分析的例子, 讨论了 3 个汇机制化学转换、干沉降和湿清除在大气污染过程中的相对重要性。结果表明, 对于硫组分来说, 气相化学反应的作用一般小于干湿沉降的作用, 其中干沉降的作用在很大程度上依赖于大气污染模式最低层厚度的取值。同时, 根据大气污染方程特征项量级的分析, 得到了控制大气污染物输送的零级近似和一级近似方程。

3.2 大气污染的气象条件研究

(1) 利用中尺度区域模式初步模拟了边界层的动力过程, 发现在白天, 边界层上部存在水平尺度为 2~3 km 的环流, 它们可能是晴空边界层内物质向自由大气输送的一种重要过程。

(2) 在北京大学和中国科学院大气物理研究所气象塔院内进行了两次边界层实验观测, 研究了城市冠层中湍流通量与扩散参数的统计特征。城市冠层中湍流运动的各种统计特征量与平坦下垫面条件下边界层湍流运动的相比, 有不同的地方也有相似的地方。无论白天还是夜晚, 垂直方向的湍流强度和湍流脉动风速标准差均小于水平方向的, 水平方向的相应湍流特征量则总是接近相等; 城市冠层中湍流脉动强度和标准差几乎均大于平坦下垫面边界层的。当平均风速 $u \geq 1 \text{ m/s}$ 时的湍流统计特征量与 $u < 1 \text{ m/s}$ 时的有所不同。

(3) 在 325 m 气象塔上, 进行了不同季节污染物浓度与气象条件的同步观测。对 1997 年 10 月底观测到的一次冷锋过程大气边界层内 O_3 及 NO_x 浓度资料的分析表明: 北京近郊大气边界中下层存在着明显的由上至下的 O_3 浓度梯度, O_3 的垂直输送与风速和温度梯度密切相关。冷锋天气过程有利于高层 O_3 向低层输送, 使 O_3 浓度垂直梯度明显减小, 使 NO_x 浓度显著降低。同时还证实了城市下游地区存在较高浓度的 O_3 分布区。

3.3 大气污染预报模式系统的研制

3.3.1 污染气象预测方法研究及其模式研制

α 中尺度污染气象预报模式: 选用两个各具特点的 Eta 模式及 APRS 模式, 将 NCAR 和 NCEP 的格点资料和非格点资料通过客观分析, 直接输入模式作为初始场及边界条件。应用 Eta 模式对天津的实例进行了模拟, 模式运行正常, 计算稳定; 运用 APRS 模式对包括复杂地形的多种情况进行实例模拟和数值实验, 该模式在边界层内保持了相当高的分辨率, 并能抓住包括雨区在内的基本气象特征。

β 中气象模式: 完成了由流体静力过程向非静力过程的转变, 提高了模式在水平和

垂直方向的分辨率和计算的稳定性。

边界层模式：初步建立了一个在垂直方向具有高分辨能力的三维大气边界层模式，该模式是在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科研人员多年工作积累的基础上开发研制的，目前已经在理想地形条件下调试成功，下一步目标是选择有观测资料可比的实际下垫面进行模拟和改进，并耦合到实际的大气污染预报模式中去。

3.3.2 城市尺度大气污染预报模式的研制

已基本完成模式的研制工作并投入实用。图 1 给出了城市污染预报流程。

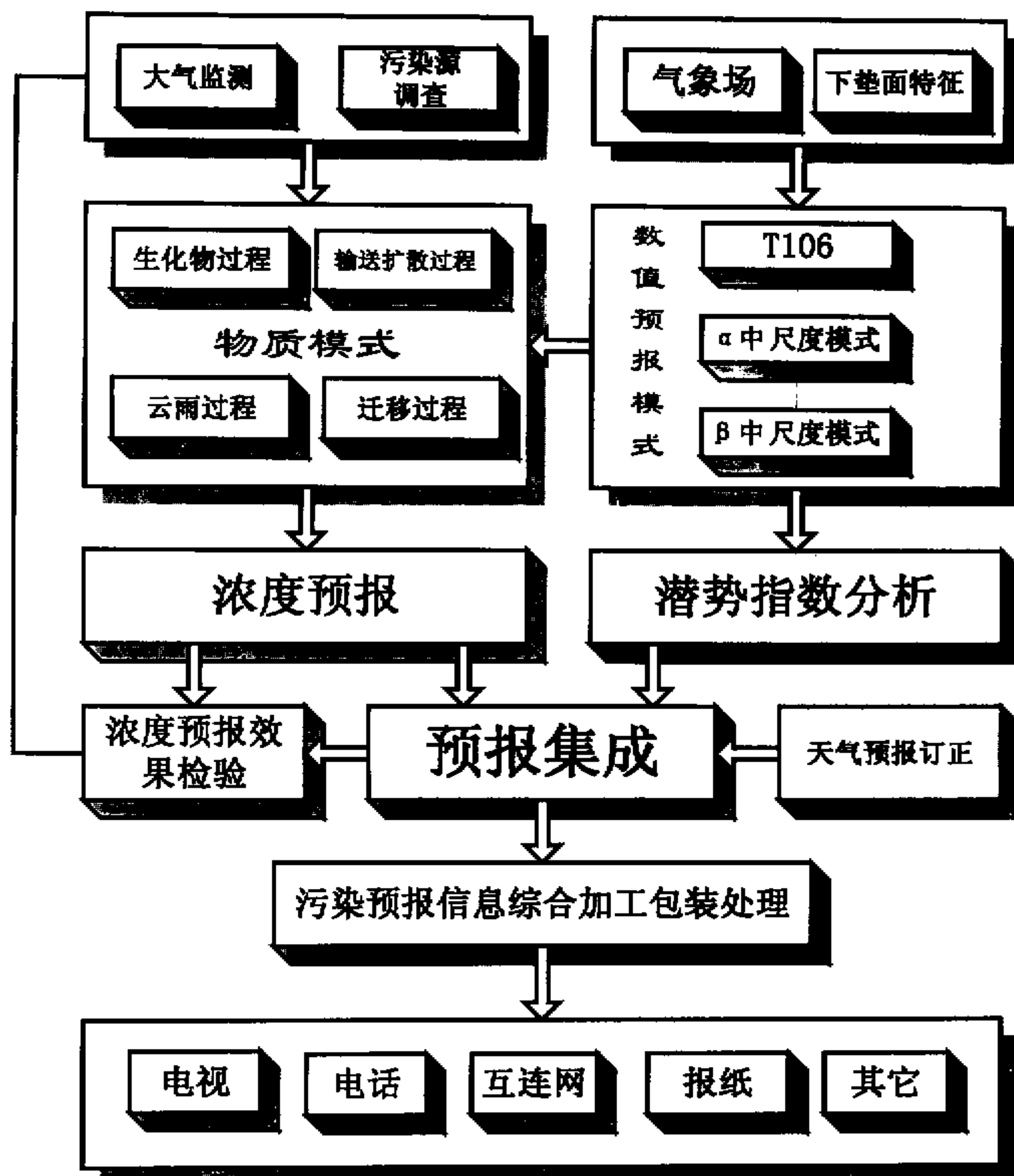


图 1 城市污染预报流程

3.3.3 区域尺度大气污染预报

该模式框图如图 2。

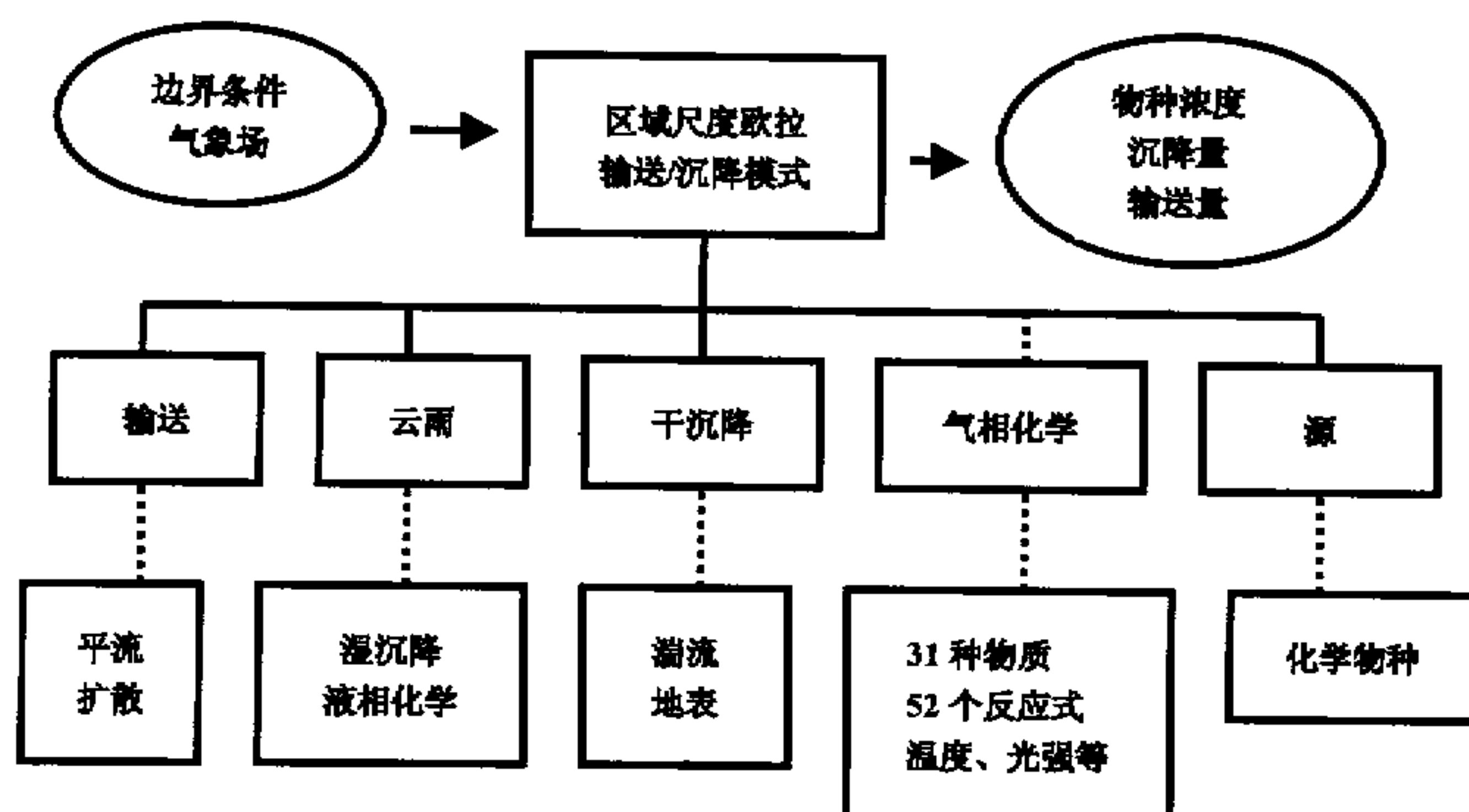


图 2 区域污染预报模式框图

3.4 大气污染预测实验研究

1998 年至今, 我们利用研制的城市大气污染预报系统与国家环境监测总站、天津市气象局和天津市环保局合作, 对天津市的大气污染物浓度进行了预报实验, 取得了较好的效果。表 1 给出了预报结果。进行这次预报实验的目的有四: 1) 了解进行城市污染预报的程序和积累开展城市污染预报的经验。包括气象资料的获取、污染源的调查和分类、城市地形和下垫面的确定、预报效果的评价等。2) 测试我们目前所有模式的性能和模式改进后的效果。参加实验的模式有 α 中尺度气象模式、 β 中尺度气象模式和城市尺度大气污染预测模式。3) 发现模式的不足, 为模式的改进寻找依据。4) 开创我国城市污染数值预报的先例, 培养从事城市污染预报的地方人才, 推动中国科学院的理论成果向应用转化。在天津开展的大气污染预报实验获得国家环保总局的高度评价。

表 1 天津市实测与预报的日平均浓度的比较 (实测值/ 预报值)

	SO ₂		NO _x		TSP	
	市区	河北	市区	河北	市区	河北
1 月 1 日	0.803	2.78	1.382	0.81	3.83	2.72
1 月 3 日	0.844	1.229	0.66	1.78	3.35	3.11
1 月 5 日	2.414	2.05	1.37	1.71	3.54	2.48
1 月 8 日	1.619	2.648	1.09	1.42	3.01	2.7
1 月 10 日	1.385	1.612	0.83	0.97	2.09	2.29
1 月 12 日	0.786	1.702	0.72	0.72	1.27	1.58

从 1998 年开始, 我们与国家环境监测总站和沈阳区域气象中心合作, 完成了为在沈阳开展城市和城市群大气污染预报业务而进行的大量准备工作。在这项工作中, 我们提供了 β 中尺度气象模式和城市尺度大气污染预测模式, 并对沈阳区域气象中心的有关人员在气象资料、污染源资料及污染源分类、地形和下垫面参数的整理及模式的运行方面进行了指导。对包括沈阳市在内的辽宁省 14 个城市进行实际的大气污染预报实验, 并在电视上发布预报结果和开通“121”污染预报电话, 取得了良好的社会效果。

我们还利用所建立的区域污染模式于 1998 年 10 月 24~25 日进行了区域预报实验 (其中 22 日、23 日有冷空气过境), 预报时效为 24~48 h, 计算时间只需 3 h, 输出 6 小时一次的 SO_2 , NO_x , O_3 。此外, 从 1998 年 4 月开始至今, 对一周来的北京地区空气污染状况作回顾和展望分析, 并于每个周末在北京人民广播电台播出 (调频 87.6 MHz), 与空气质量周报符合较好, 受到北京市民的欢迎。

此外, 还结合上述预报实验研制了一套污染预报演示系统。

4 结语

经过参加项目研究工作的全体专家和科研人员的努力, 本项目取得了很好的阶段性成果, 在中国科学院主持对该项目中期评估验收时, 得到有关专家的高度评价。特别需要指出的是, 本项目在执行过程中, 获得了如何及时将科研成果推向国家有关对口部门、推向社会的宝贵经验, 培养了一批优秀的大气环境研究青年人才。下一步将继续围绕项目既定的具体目标开展深入的研究工作, 将有关的理论和实验研究新成果在国际上发表。不断完善预报模式系统, 扩大成果推广范围, 争取在更多的大城市开展实际的大气污染预报。

Advanced in Research of the Theory and Method of Air Pollution Prediction

Hong Zhongxiang and Hu Fei

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

Abstract Significance, goal and content of “the Theory and Method of Air Pollution Prediction”, the major research project of Chinese Academy of Sciences in the period of the ninth 5-year plan, are introduced. Some advances in the research of the project are given in this paper.

Key words air pollution prediction air pollution dynamic air pollution model