

城市空气污染数值预报试验

韩志伟 张美根 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 采用城市空气污染数值预报模式系统, 并结合天津市部分气象资料和浓度监测资料对1998年1月1~15日的 SO_2 、 NO_x 和TSP浓度进行数值模拟和试预报。结果表明, 该模式运行稳定, 计算满足预报时效要求, 对 SO_2 和 NO_x 日均值预报的准确率可分别达到64%和70%, 对 SO_2 逐时预报的准确率为55%~62%, 对TSP预报的准确率低于 SO_2 和 NO_x 。此次预报试验说明, 该模式可作为城市空气污染数值预报的基本模式进行初步应用, 但仍需进一步的研究、发展和完善。

关键词 空气污染 数值预报 预报时效 准确率

1 引言

环境与发展是当今世界共同关注的重大问题, 环境保护与经济持续发展的协调是各国政府面临的一个严峻而又亟待解决的难题^[1]。目前, 我国经济正处在高速发展期, 能源、交通(特别是城市汽车尾气)规模的扩大、城市人口的膨胀、大型工业开发区的发展等造成城市大气污染日趋严重。为了保证我国经济的可持续发展, 保护人民的生命健康, 也为使我国大气环境预测、预报工作与国际接轨, 开展城市空气质量报告及空气污染预报工作迫在眉睫。

为很好地反映大气环境污染状况及变化趋势, 为环境管理决策提供定量、及时、准确、全面的大气环境质量信息, 建立一个适合于我国城市特点的空气污染数值模式预报系统是十分必要的。

本次预报试验是在国家环境保护总局下属部门中国环境监测总站的组织下, 在中国科学院资环局重大项目“大气污染预测的理论和研究方法研究”的资助下, 联合天津市环境监测站, 天津市气象科研所等部门联合进行的, 它是一项前期研究工作, 其研究目标是为我国开展重点城市空气污染预报工作提供初步的数值预报方法及模式系统, 为进一步开展城市空气污染预报研究打下基础。

本文采用了一个由 α 中尺度、 β 中尺度动力学模式和物质(浓度)模式组成的模式系统, 由 α 中尺度动力学模式预报大尺度天气过程, 同时其输出的气象场作为 β 中尺度模式的初始场和同化场, 由 β 中尺度模式预报城市尺度不同地形及下垫面的热力和动力作用, 细致地反应局地环流和边界层结构, 其预报的风、温场作为物质模式的输入

场并进行逐时的物质浓度预报, 由此构成完整的城市大气污染数值预报系统。该模式系统的具体介绍参看文献[2~4], 本文介绍模拟结果及分析。

本文采用的 ETA 模式 (α 中尺度), β 中尺度动力学模式和物质 (浓度) 模式曾成功地应用于各省、市气象局和环保部门的科研课题和日常业务, 模式性能和效果也经过专家的鉴定和认证, 具有科学性和可靠性。三个模式联合进行城市空气污染数值预报在国内还是第一次。

2 资料输入及参数选取

2.1 模式参数

模式采用的水平网格数为 60×30 , 格距为 2.5 km, 垂直方向分为 12 层, 其中 1 km 以下有 9 层, 模式顶到 5 km。模式垂直分层见表 1。

表 1 物质模式垂直分层

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
z	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

2.2 污染源

在天津市污染预报中, 使用的人为源有 SO_2 、 NO_2 、 NO 、 CO 和 TSP 五种, 它们又分为地面源和 10 m 以上的高架源。高架源的烟气抬升采用 Briggs 公式计算^[5]。将整个预报范围内的污染源合并和简化成 761 个, 其中有 534 个高架源, 面源当成点源处理, 其排放高度在最低模式网格层上, 未考虑生物源。天津市几个大的污染源的位置、排放物质及排放量列于表 2。

表 2 天津市大污染源位置及排放量

							g/s
k	i	j	SO_2	NO	NO_2	CO	TSP
6	1	13	133.94	23.08	46.17	10.65	157.52
3	8	18	101.61	15.76	31.51	7.27	114.63
3	10	17	101.56	15.64	31.27	7.22	107.16
7	11	17	769.74	119.92	239.83	55.35	1020.4
6	18	15	289.82	49.95	99.9	23.05	348.43
7	18	15	1337.97	230.6	461.19	106.43	1608.6
7	21	2	870.12	134.66	269.32	62.15	918.94
7	21	5	300.74	50.02	100.04	23.09	317.63
7	27	12	365.85	61.11	122.23	28.21	439.25
7	30	20	160.22	27.61	55.23	12.74	182.28

i, j, k 是网格点坐标, 其中 $i=10, j=17$ 位于市区, $i=21, j=5$; $i=21, j=2$ 位于大港, $i=28, j=12$ 位于塘沽

2.3 三维风、温场及大气稳定度参数

由 β 中尺度模式预报的逐时三维风、温场作为浓度预报模式的输入场, 每个积分时间步长的值则由逐时值线性内插得到。模式所需大气稳定度参数理查孙数 Ri 、莫宁-奥布霍夫长 L_M 和 PBL 稳定度参数 $\mu = z_i / L_M$ 由风速和温度随高度分布计算得到。

2.4 下垫面型及地形标高

模式需要每个网格点的地形标高、下垫面类型和对应的粗糙度长 z_0 , 天津地处华

北平原, 地形平坦, 模式中地形标高取为 2 m。天津地区下垫面类型分为农田、城市、水域、滩涂四类 (见图 1)。

2.5 降水量

湿沉降过程所需的每小时降水量由 α 中尺度动力学模式 (ETA) 提供。对不同化学物质, 降水冲刷系数参考历史资料决定。

2.6 观测站点及资料

模拟时段天津地区有九个气象监测站点 (市区、西郊、北郊、南郊、东郊、静海、塘沽、大港和海上的 A 平台), 两个浓度监测站点 (市站、河北站)。它们提供逐时的地面风向、风速和浓度值。由于 1 月份天津市污染物监测资料的连续性较差, 有些资料不合理, 因此通过分析整理, 模拟时段内市区和河北两个监测站共有 6 天有效浓度监测资料。

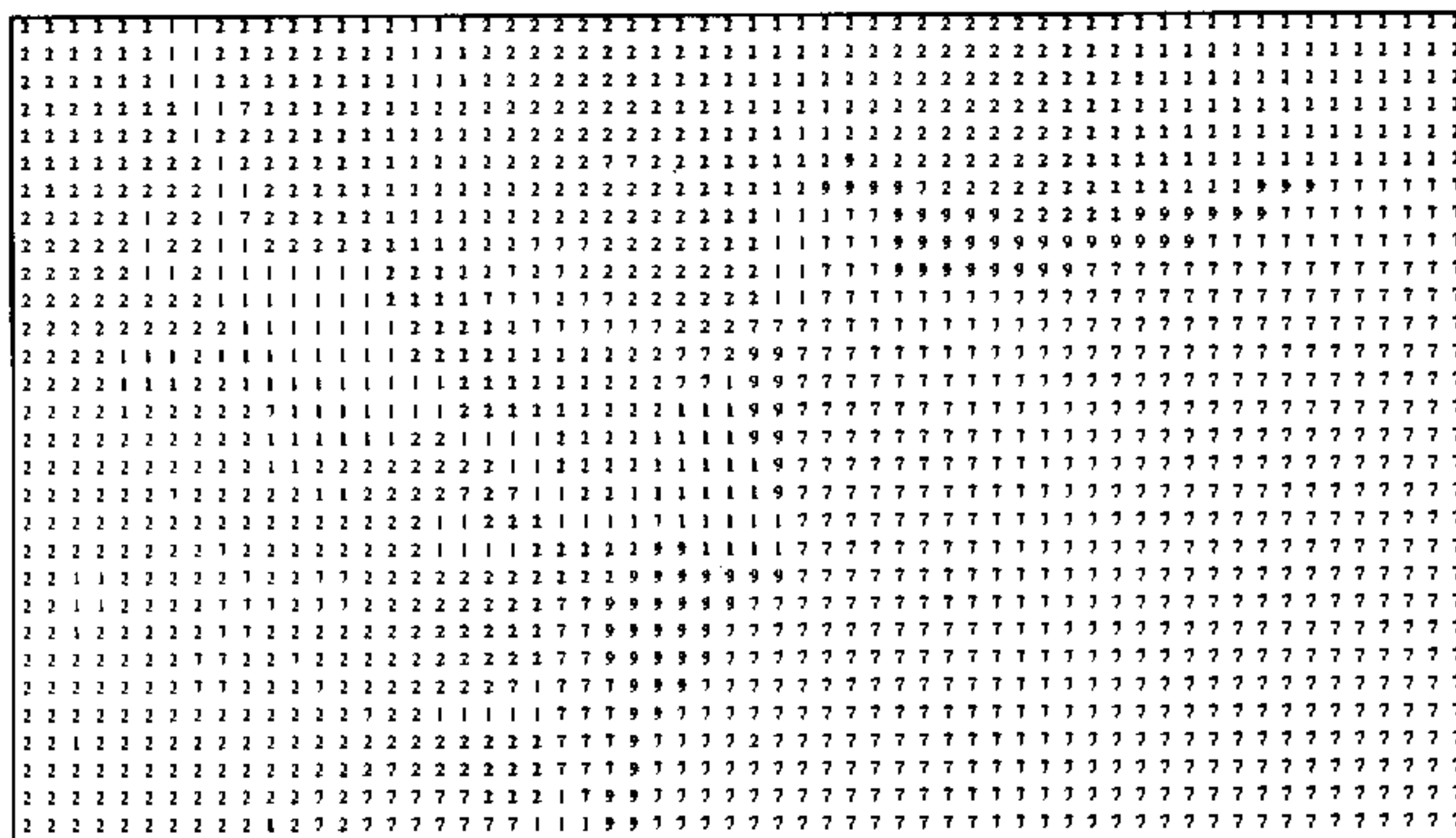


图 1 天津市下垫面类型

1: 城区, 2: 农田, 7: 水域, 9: 滩涂。图中格点数 60×30 , 格距为 2.5 km

3 数值预报和结果分析

3.1 预报结果分析及检验

3.1.1 气象模式

将 β 中尺度模式预报的 15 天地面风场与天津市 9 个气象观测站风场进行对比分析和统计, 结果表明, β 中尺度预报的风向偏差小于 60° 范围的个例达到 64.3%; 对风速而言, 预报与实测比值的平均值为 0.97, 但标准差较大。

从一天风场的流型及日变化来看, 在 15 天的模拟中, 总体来说, β 中尺度的预报结果与实测接近, 15 天中有 11 天预报较好, 有 4 天预报较差。

在认为实测资料可信的情况下, 预报结果与实测差别的原因可能是: 1) α 中尺度

模式预报的大尺度背景场不理想,使 β 中尺度模式没有准确的初始场和同化场;2) β 中尺度模式的模拟的精度或敏感性不够。这需要在今后的工作中进一步研究。

3.1.2 浓度模式

将模式预报的 15 天地面 SO_2 、 NO_x 和 TSP 浓度与天津市同步监测浓度进行对比分析和统计,结果表明, SO_2 、 NO_x 日均值的预报较好,预报准确率分别为 64% 和 70%,对 TSP 日均值的模拟相对较差;对市区污染物逐时的预报与观测值相比相差较大。差别的原因一是未考虑源的日变化,二是模式的分辨率不够细致,未能反应更小尺度的气象信息和源信息。表 3 是实测浓度与预报浓度的比较。

表 3 实测与预报的 6 天日平均浓度的比值

污染物	SO_2		NO_x		TSP	
站点	市区	河北	市区	河北	市区	河北
	0.803	2.78	1.382	0.81	3.83	2.72
	0.844	1.229	0.66	1.78	3.35	3.11
	2.414	2.05	1.37	1.71	3.54	2.48
	1.619	2.648	1.09	1.42	3.01	2.7
	1.385	1.612	0.83	0.97	2.09	2.29
	0.786	1.702	0.72	0.72	1.27	1.58
比值平均	1.308	2.01	1.01	1.24	2.84	2.48
标准差	0.64	0.61	0.32	0.46	0.98	0.52

通过实测和预报浓度的对比,得到以下结果:

(1) 在市区和河北站,二氧化硫实测值与预报值日均浓度比值的平均值分别为 1.31 ± 0.64 和 2.01 ± 0.61 。通过对 6 天逐时有效资料的对比和统计分析,结果表明,二氧化硫日均值预报的准确率可以达到 64%,对每小时浓度预报的准确率为 55%~62%。

(2) 氮氧化物实测与预报值日均浓度比值的平均值分别为 1.01 ± 0.32 和 1.24 ± 0.46 。

(3) 对 TSP,实测值与预报值日均浓度比值的平均值为 2.84 ± 0.98 和 2.48 ± 0.52 。因此对尘的源强需进一步核实和订正。

3.2 实例分析

在 15 天的预报中,模拟了 SO_2 、 NO_x 和 TSP 的三维浓度时空分布,得到不同流型下天津地区特定的浓度分布型,这对今后的大气污染预报及控制十分重要,下面将选取个例(1月9日)给出实际预报结果并进行分析。

1月9日整个区域无论是风向还是风速变化都比较剧烈。图 2 给出了地面风场日变化。开始时(02:00)为西南风,风速约 3 m/s;然后(08:00)转为偏西风,风速减小;到 12:00,区域西部为偏北风,东部为偏西风,风速明显减小,平均约 1.0 m/s,此时整个区域流场变化较大,非均匀性较强;从 13:00 到 16:00,整个区域多为小风或静风,区域的中间地带风速最小;17:00 以后,风向转为偏北风,最后转为东北风,风速逐渐增大。

这天高空流场为偏西风向偏北风转换型,与地面流型变化类似,但风速明显大于地面,而且流型比地面平稳,非均匀性较小。12:00 左右,区域中部有比较明显的辐合

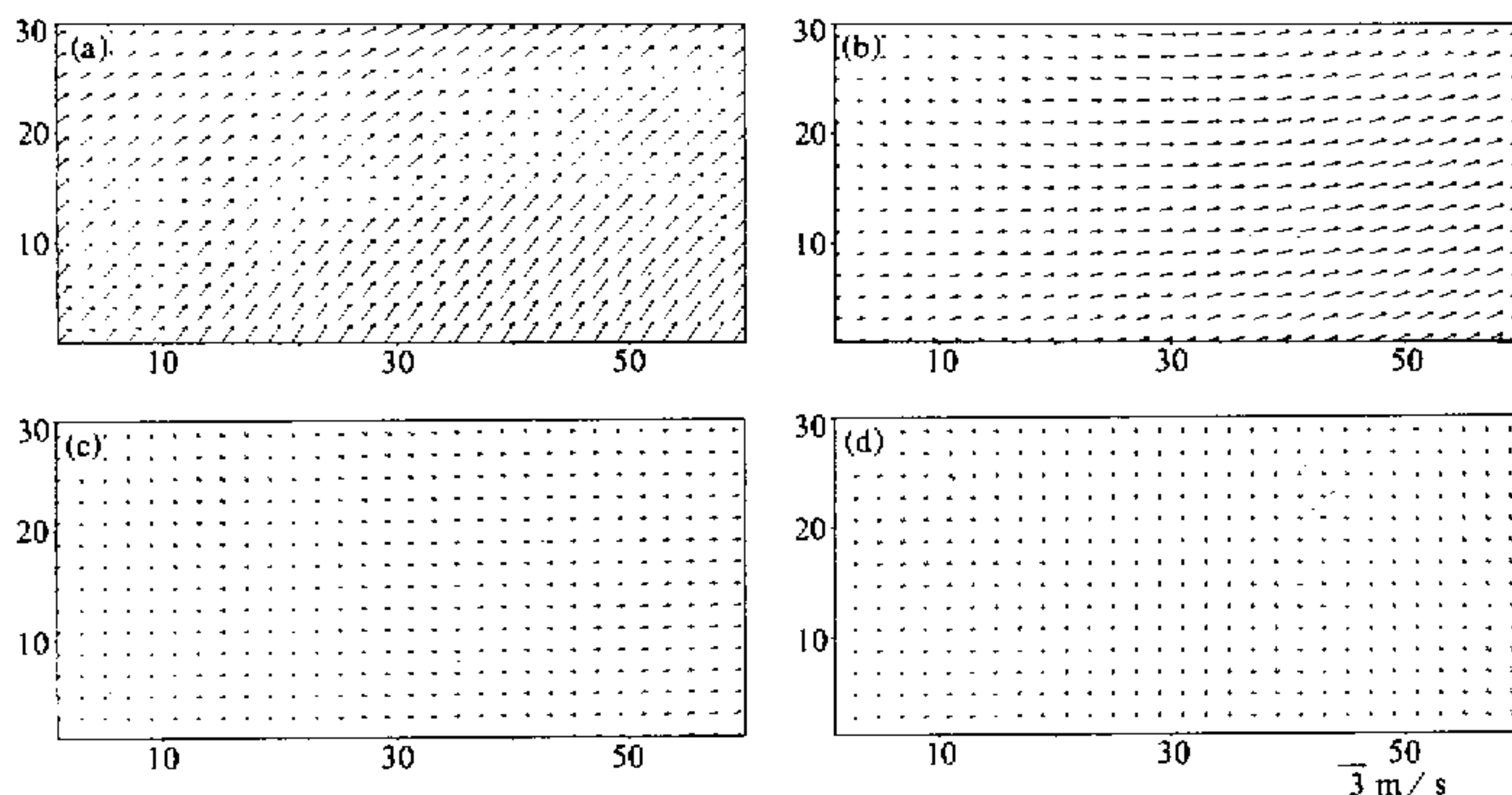


图2 模式预报的1月9日地面风场
(a) 02:00; (b) 08:00; (c) 12:00; (d) 18:00

区。1000 m 以上的高空以偏西风为主, 风速大, 流场均匀。

图3反映了1月9日 SO_2 地面体积分数日变化过程。从图3a(02:00)可以看到, 体积分数分布型为东北-西南走向。整个区域有6个大的体积分数中心, 最大的达到 500×10^{-9} , 在市区的东部。市区最大体积分数超过 100×10^{-9} , 沿着海岸线有3个体积分数中心, 体积分数值分别为 300×10^{-9} 、 200×10^{-9} 、 100×10^{-9} , 形成一沿海岸的污染带。此外, 在市区的东北还有一个 500×10^{-9} 的中心。由于地面源并不大, 此时地面的高体积分数中心, 除了地面源的部分贡献外主要是高架源的作用, 这些源可以在下风风向造成局地的高体积分数。

08:00(图3b), 地面风向转为西风, 体积分数分布型基本上为东西走向, 此时由于时间的延续, 高架源的影响进一步加强, 在下风方向(区域东部)出现了多个体积分数大值区, 可发现 500×10^{-9} 以上的体积分数中心有4个, 400×10^{-9} 以上的有6个, 此外还有几个 100×10^{-9} 以上的体积分数中心, 此时污染最严重的区域为东部沿海地区和市区的东部; 市区体积分数变化不大。

12:00时(图3c), 地面风场不均匀, 但总体是风向偏西, 风速较小, 所以此时地面体积分数增加, 表现为区域最大接地体积分数达到 750×10^{-9} , 东部沿岸体积分数依然很高, 海上体积分数增加十分明显, 说明原来沿海岸的污染带已移至海上。此时的体积分数是一天中最大的。

18:00(图3d), 地面风向转为偏北风, 风速很小, 平均约 1 m/s , 体积分数分布向南偏转, 陆上的大体积分数中心向西南偏移, 而此时海上的地面体积分数比12:00有所减小, 750×10^{-9} 的体积分数中心消失, 其原因一是南部接近边界, 最大接地体积分数无法反应出来; 二是高空风速增加。

图4是模式预报1月9日地面 NO_2 体积分数。除了02:00(图4a), NO_2 体积分数分布型与 SO_2 相似外, 其它时刻体积分数分布相差较大。主要表现在: 1) 沿海和海上

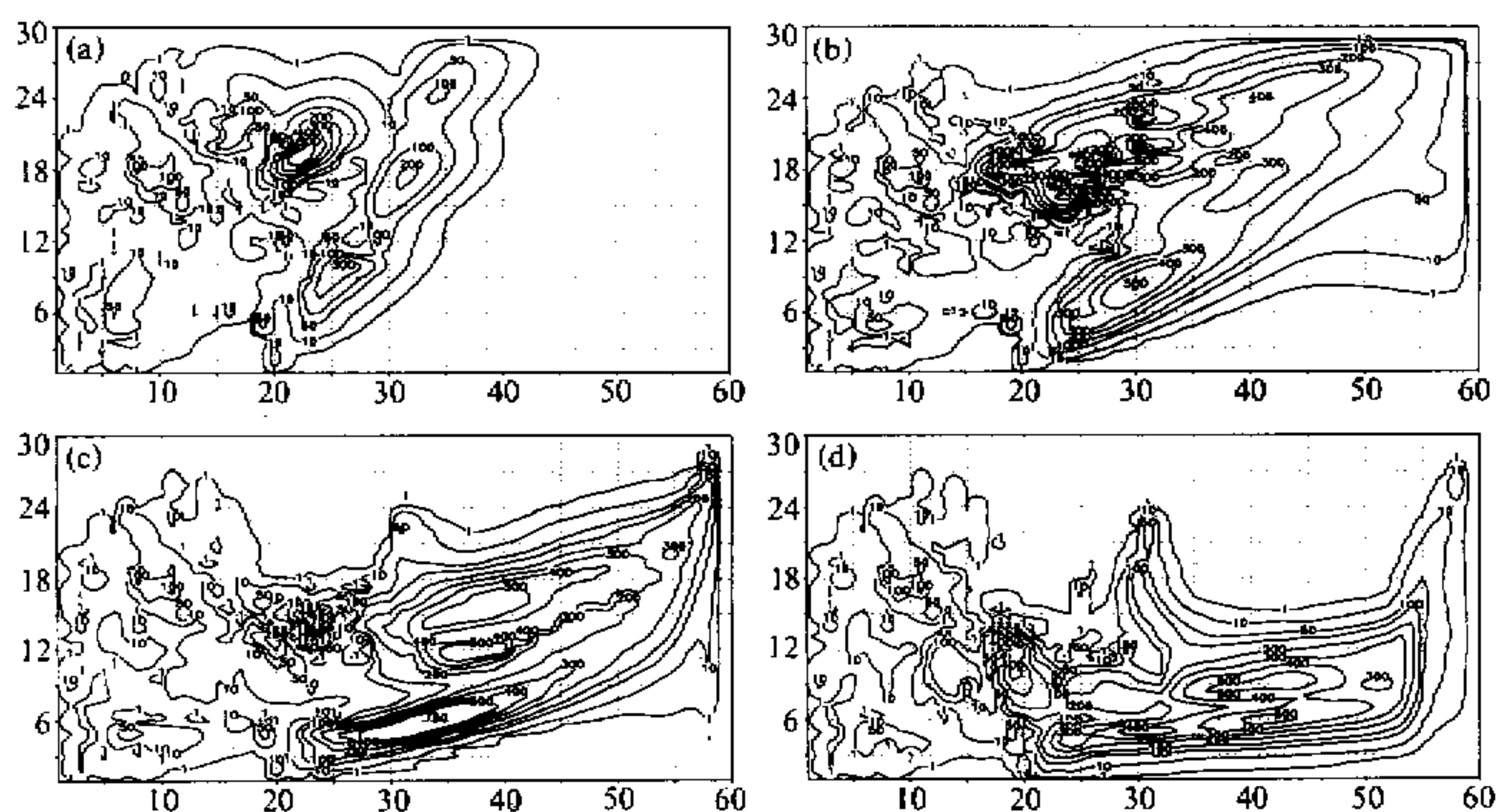


图3 模式预报的1月9日 SO_2 体积分数分布
(a) 02:00; (b) 08:00; (c) 12:00; (d) 18:00. 单位: 10^{-9}

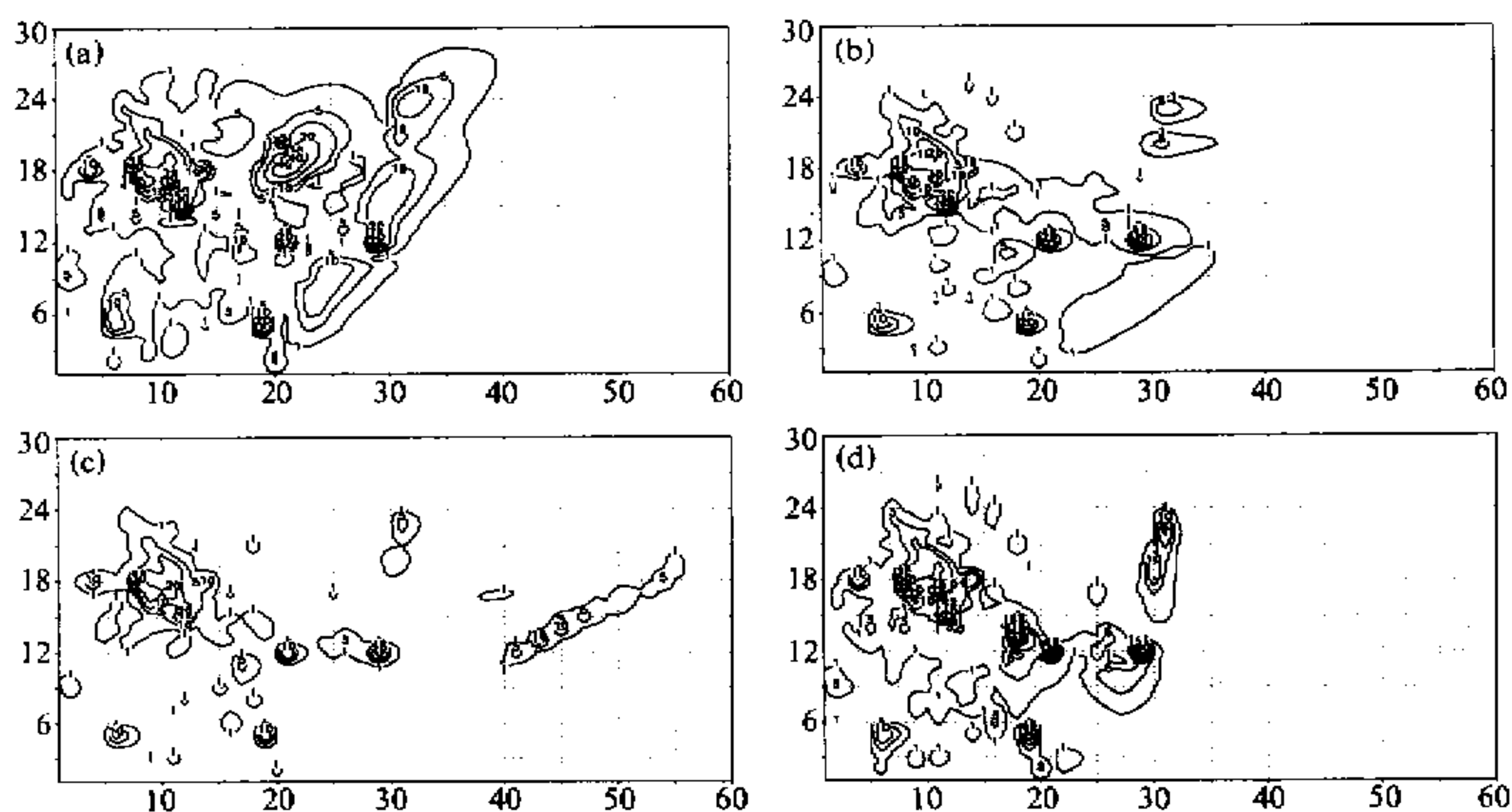


图4 模式预报的1月9日 NO_2 体积分数分布
(a) 02:00; (b) 08:00; (c) 12:00; (d) 18:00. 单位: 10^{-9}

NO_2 体积分数较小; 2) 市区 NO_2 体积分数在整个区域中较大。这说明市区 NO_2 污染主要是地面源的贡献; 高架源对 NO_2 体积分数的贡献明显小于 SO_2 。这反应了二者的污染源结构的差异; 3) NO_2 体积分数表现出明显的日变化, 白天低于晚上, 这与白天 NO_2 涉及的光化学反应有关。

TSP 体积分数分布与 SO_2 相似, 这主要是由于模式中考虑的 TSP 在大气中的物理过程与 SO_2 相近, TSP 在模式中没有考虑化学过程。整个区域 TSP 体积分数明显高于 SO_2 , 这主要是由于 TSP 源大于 SO_2 。

4 结论

通过对模式系统的设计、调试和敏感性分析及其对天津市的实例预报试验结果的综合分析, 得到以下结论:

(1) 用 ETA、 β 中尺度和浓度模式组成的模式系统对天津市进行连续 15 天的城市大气污染的试验性预报, 计算稳定, 得到了三维逐时的 SO_2 、 NO_x 和 TSP 的浓度场, 预报基本成功, 表明模式系统的结构合理, 该系统已基本具备城市污染预报的能力。

(2) 模式预报的 15 天地面 SO_2 、 NO_x 和 TSP 浓度与天津市同步监测浓度对比表明, 该系统对 SO_2 、 NO_x 日均值的预报较好, 对 TSP 日均值的模拟相对较差; 对市区污染物逐时的预报与观测值相比相差较大。

(3) 模式预报的结果与污染源密切相关, 应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, 如对尘污染源、交通源(汽车), 污染源的年、月、日变化及特定变化等。同时, 应提高监测数据的质量, 使监测结果准确、合理, 有利于预报结果的检验。

总之, 通过此项课题的研究, 城市空气污染数值预报模式系统已基本建立, 完成了预期目标, 达到了预期效果, 可以进行下一步的试预报并继续深入进行该模式系统的研究和应用。

致 谢 感谢中国科学院大气物理研究所赵思雄、陈红, 天津市环境监测站邵莹、刘彩霞、张玉芬、王颖、于洋和天津市气象科学研究所的谢以扬、王长有朱玉强在预报实验过程中给予的支持和协作

参 考 文 献

- 1 Corell, R. W., 1991: The US global change research program: an overview and perspectives on TY 1992 program, *Bull. AMS*, 72, 5.
- 2 雷孝恩、张美根和韩志伟, 1998, 大气污染数值预报基础和模式, 北京: 气象出版社, 197~221.
- 3 张美根、韩志伟、雷孝恩等, 1999, 天津市空气污染数值预报试验中的模式系统介绍, *气候与环境研究*, 4(3), 237~243.
- 4 Lei Xiaoen, Han Zhiwei and Zhang Meigen, 1998, *Physical, Chemical, Biological Processes and Mathematical Model on Air Pollution*, China Meteorological Press, 355pp.
- 5 雷孝恩、贾新媛和扬锦德, 1981, 十公里范围垂直扩散参数的一个估算方法, *大气科学*, 5, 368~375.

Numerical Prediction of Air Pollution in Urban Area

Han Zhiwei, Zhang Meigen and Lei Xiaoen

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

Tong Yanchao

(Chinese Chief Observation Station of Environment, Beijing 100029)

Abstract By using Urban Air Pollution Forecast Model System and observation data of meteorology and species concentration from January, 1, 1998 to January, 15, 1998, we proceed the numerical prediction of SO_2 , NO_x and TSP in tianjin area for 15 days. The result shows that the system has a good stability and satisfied time efficiency. The accuracy rate of prediction of diurnal average concentration of SO_2 and NO_x are 60% and 70%, The accuracy rate of hourly average concentration of SO_2 are 55% ~ 62%; The accuracy rate of TSP concentration is smaller than SO_2 and NO_x . The prediction test shows that this model system can be used as a basic numerical tool in forecasting urban air pollution circumstance, and be developed and advanced in the future.

Key words air pollution numerical prediction time efficiency of prediction accuracy rate of prediction

《气候与环境研究》启用新的国内统一刊号

根据新闻出版署的规定, 近日, 《气候与环境研究》重新进行期刊登记, 并分配到新的国内统一刊号。从本期开始, 《气候与环境研究》启用新的国内统一刊号——CN11-2786/P, 敬请有关部门注意。

《气候与环境研究》编辑部
