

天津市总悬浮颗粒物浓度分布的数值模拟^{*}

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)

摘 要 根据天津市总悬浮颗粒物的监测结果, 用化学元素质量平衡法对监测点总悬浮颗粒物的来源进行了解析, 简要介绍了天津市空气污染数值预报实验中总悬浮颗粒物的预报方法及其预报结果。

关键词: 总悬浮颗粒物; 空气污染; 预报

1 引言

总悬浮颗粒物 (TSP) 是我国许多城市, 特别是北方干燥地区城市最主要的大气污染物。天津市 TSP 的浓度经常超过国家环境质量标准 (见表 1 和表 2), 控制 TSP 的排放是改善天津市大气环境的首要任务之一。为了制定经济有效的污染控制措施, 不仅需要综合评价环境质量状况, 实测不同天气条件下 TSP 的浓度和化学组成, 还需要对 TSP 的来源进行定量分析, 从而有针对性地治理。由监测点测量的 TSP 质量浓度和各种化学成分的浓度推断各类污染源对监测点 TSP 贡献的接收点模式可分为化学元素质量平衡法^[1]和因子分析法^[2]。研究^[1,3]表明, 用化学元素质量平衡法研究 TSP 来源取得了比较好的结果。

TSP 浓度是城市空气污染预报的一个重要预报量。与二氧化硫 (SO_2) 和氮氧化物 (NO_x) 不同, TSP 浓度预报还存在许多问题, 如聚合、干湿清除、化学过程等。在天津市空气污染数值预报实验^[4]期间, TSP 的质量浓度是用城市空气污染预报模式来预报的。在这个模式中, TSP 的粒径假设是相同的, 且未考虑在大气中的化学过程。

2 天津市 TSP 的浓度分布及市区 TSP 的来源

2.1 天津市 TSP 的浓度分布

天津市城区有 7 个国控测点 (包括 1 个清洁对照点, 即天津市西青区侯台子), 观测项目有 SO_2 、 NO_x 和 TSP。自 1994 年以来, TSP 的监测频率为隔日 24 小时连续监测。1997 年 TSP 的浓度观测值见表 1 和表 2。

从表 1 和表 2 可以看到, 取暖期的 TSP 浓度高于非取暖期的, 春季的大于夏季和秋季的。这一方面说明了取暖期间 TSP 的源排放量大, 夏季和秋季大气有利于 TSP 的扩散, 而冬季则不利于 TSP 的扩散, 另一方面也说明了春季自然尘的增加对天津市

TSP 浓度有重要影响。

为了展示 1994 年以来 TSP 浓度的变化趋势, 我们将天津市城区平均 TSP 浓度列于表 3。

表 1 1997 年天津市国控测点 TSP 的监测浓度

测点 (行政区)	取暖期	非取暖期	年均值	超标率
市监测中心 (南开区)	0.362	0.297	0.319	51.9%
稻香村 (和平区)	0.414	0.266	0.319	46.5%
河东监测站 (河东区)	0.423	0.328	0.364	60.3%
继电器厂 (红桥区)	0.379	0.311	0.322	59.8%
机车车辆厂 (河北区)	0.391	0.328	0.349	61.3%
河西监测站 (河西区)	0.399	0.333	0.355	56.9%
侯台子 (西青区)	0.358	0.344	0.349	57.9%

表 2 1997 城区空气国控点 TSP 浓度

24 小时连续监测结果 mg/m^3

月份	均值	范围值	超标率
1	0.406	0.159~1.192	69.7%
2	0.335	0.119~0.667	55.9%
3	0.409	0.032~0.718	87.1%
4	0.366	0.121~0.821	70.1%
5	0.344	0.089~0.690	58.8%
6	0.314	0.099~0.745	50.7%
7	0.295	0.116~0.519	38.5%
8	0.267	0.091~0.408	28.6%
9	0.281	0.124~0.465	42.9%
10	0.307	0.142~0.524	47.4%
11	0.363	0.150~0.734	65.3%
12	0.443	0.109~0.965	73.6%
全年	0.339	0.032~1.192	56.0%

表 3 天津市城区平均

TSP 浓度年度变化 mg/m^3

年 度	取暖期	非取暖期	年均值
1994	0.390	0.280	0.328
1995	0.372	0.260	0.306
1996	0.385	0.272	0.317
1997	0.396	0.310	0.339

在观测 TSP 浓度的同时, 对降尘浓度也进行了监测 (1997 年的监测结果见表 4)。与 1996 年相比, 降尘浓度在天津市城区范围内普遍升高。1996 年 4 个季度的平均值和年均值分别为 10.3、14.6、12.2、11.6 和 $12.2\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{月})$ 。

表 4 1997 年城区降尘监测结果

$\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{月})$

测点 (行政区)	第 1 季度	第 2 季度	第 3 季度	第 4 季度	年均值
市监测中心 (南开区)	15.4	20.0	14.1	17.5	16.8
稻香村 (和平区)	16.0	18.4	15.9	17.2	16.9
河东监测站 (河东区)	10.2	14.3	9.1	11.8	11.3
继电器厂 (红桥区)	12.5	13.3	12.5	12.0	12.6
机车车辆厂 (河北区)	10.0	11.5	8.4	11.1	10.3
河西监测站 (河西区)	17.1	20.0	17.5	16.1	17.7
侯台子 (西青区)	7.5	11.3	7.9	8.4	8.8
城区均值	13.6	16.2	12.9	14.3	14.2
超标率	30.7%	28.2%	27.6%	35.9%	30.6%

2.2 污染源解析

根据天津市能源结构、工业类型与水平分布特征以及气象地理条件, 选择了 8 种 TSP 污染源, 即燃煤烟尘 (工业和民用)、行车道路尘、建筑材料尘、风沙尘、海盐

尘、钢铁冶金尘和燃油飞尘，并用化学元素质量平衡法计算出了这 8 种污染源对市区 TSP 的贡献。由表 5 可知，贡献值最大的是煤烟，其次是建筑尘，海盐尘贡献最小。

表 5 天津市城区 TSP 不同来源的贡献值 μg / m³

元素	风沙尘	海盐尘	工业煤烟	民用煤烟	燃油飞灰	汽车尘	建筑尘	钢铁尘
总量	37.6	3.08	75.2	81.7	7.71	6.14	64.7	12.02
Na	0.54	0.98	0.35	0.32	0.036	0	0.032	0.021
Al	2.48	0	11.75	2.35	0.017	0	0.63	0.035
Si	10.65	0	11.9	3.87	0.031	0	4.36	0.155
Ca	1.26	0.044	1.39	2.27	0	0.044	15.03	1.66
Ti	0.14	0	0.65	0.38	0	0	0.102	0.042
Fe	1.19	0	2.06	1.85	9.2×10^{-3}	0.046	0.554	3.53
Ni	1.1×10^{-3}	0	6×10^{-3}	2.5×10^{-3}	0.014	0	6.4×10^{-4}	1.2×10^{-4}
Zn	3.9×10^{-3}	0	0.014	0.49	6.6×10^{-4}	0.014	4.6×10^{-3}	0.133
Pb	7.8×10^{-4}	0	7.4×10^{-3}	0.10	0	0.25	9.8×10^{-3}	0.027

在非采暖期，自然源的贡献比燃煤源小 1 倍多；在取暖期，燃煤源的贡献最大，多于其他源的总和。从表 6 可以看到，市区 TSP 主要来源于工业和民用燃煤烟，其次是建筑尘和土壤风沙尘。

表 6 天津市城区近地面大气 TSP 污染源的分担率 (%)

类型	自然源				燃煤源			燃油源			工业粉尘		
	土壤风沙	海盐	其他	合计	工业燃煤	民用燃煤	合计	工业燃油	汽车尾气	合计	建筑尘	钢铁尘	合计
非取暖期	15	1	9	25	20	21	41	2	2	4	26	4	30
取暖期	10	1	4	15	29	31	60	3	2	5	17	3	20
全年	12	1	8	21	24	26	50	2	2	4	21	4	25

3 TSP 质量浓度的预报

3.1 模式及输入资料

天津市空气污染数值预报的模式系统是由中国科学院大气物理研究所研制的。这个模式系统由 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^{[1][4~6]}。输入的资料有 T106 气象格点 ($1^{\circ} \times 1^{\circ}$)、天津市地形高度和下垫面类型 ($2.5 \text{ km} \times 2.5 \text{ km}$) 以及和污染源资料 (源强、源高、位置及类别)。TSP 的源强和在模式网格中的坐标见表 7。

3.2 预报结果

天津市空气污染数值预报实验共进行了 15 天 (1998 年 1 月 1~15 日)，取得了 15 个 24 小时三维的 TSP 质量浓度分布。结合 15 天预报的风场和 TSP 的浓度场，我们看到 TSP 的浓度分布与风场有很好的对应关系 (如 1 月 9 日)。在这一天，地面 (高度为 7 m) 开始时吹西南风 (02:00，见图 1)，风速约 3 m/s ，此时的 TSP 浓度分布为东北

1) 中国科学院大气物理研究所,“城市空气污染预报方法及模式研究”研究报告, 1998, pp.58

-西南走向（见图 2）；然后风速开始转为偏西风，风速减小（08:00）；12:00 时模拟区域西部为偏北风，东部为偏西风，风速明显减小，平均约为 1 m/s；从 13:00 到 16:00，整个区域多为小风和静风；17:00 以后，风向转为偏北风，风速逐渐增大（见图 3），与此相应，TSP 浓度分布向南方向偏转（见图 4）。

由于 1998 年 1 月份天津市污染物监测资料的连续性很差，有些资料不合理，因此我们只得到了 6 天的有效监测资料。在与市区和河北两个监测站有效资料对比后（比较结果见表 8），我们得到如下结论：监测值与计算值小时浓度与日平均浓度的比值的平均值分别为 3.84 ± 0.98 和 2.48 ± 0.52 。

表 7 天津市 TSP 的源强及其网格点坐标

x 方向格点	y 方向网点	垂直方向网点	TSP/(g/s)
1	13	6	158
8	18	3	115
10	17	3	107
11	17	7	1020
18	15	6	348
18	15	7	1609
21	2	7	919
21	5	7	318
27	12	7	439
30	20	7	182

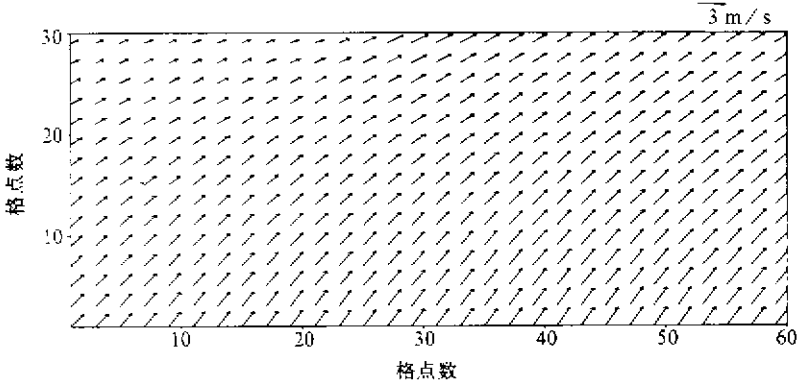


图 1 1998 年 1 月 9 日 02:00 地面流场

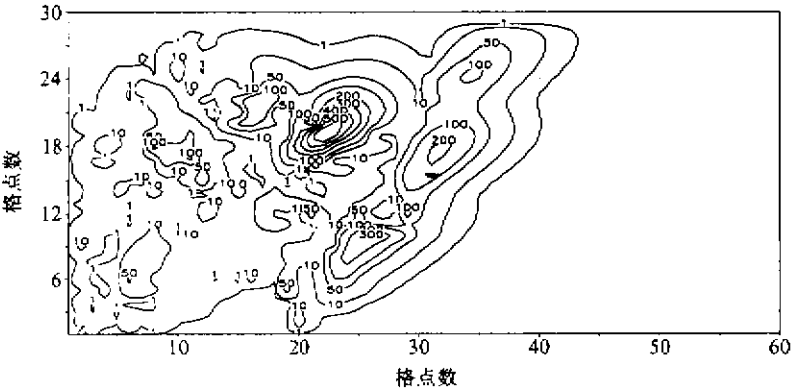


图 2 1998 年 1 月 9 日 02:00 地面 TSP 的体积分数
单位: $\times 10^{-9}$

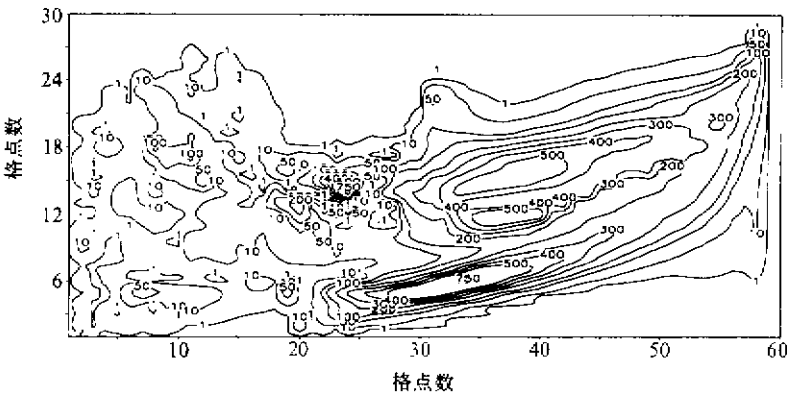


图 3 1998 年 1 月 9 日 18:00 地面流场

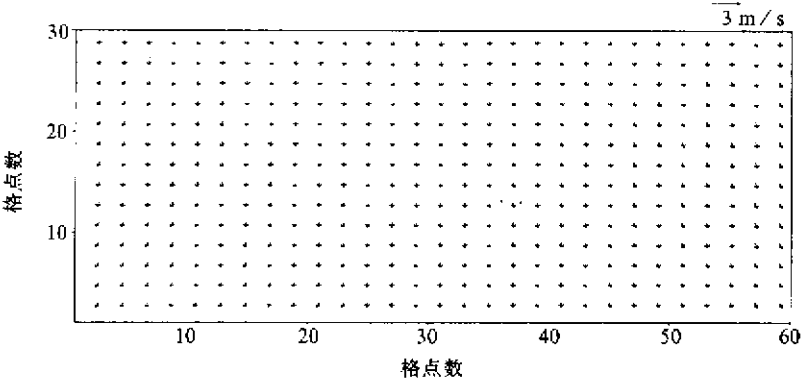


图 4 1998 年 1 月 9 日 18:00 地面 TSP 的体积分
单位: $\times 10^{-9}$

表 8 TSP 监测与计算浓度之比值

测 点	市区站	河北站
1 月 1 日	3.84	2.72
1 月 3 日	3.35	3.11
1 月 5 日	3.54	2.48
1 月 8 日	3.01	2.7
1 月 10 日	2.09	2.29
1 月 12 日	1.27	1.58
平均比值	2.84	2.48
标准差	0.98	0.52

通过分析, 我们发现 TSP 浓度的计算值与监测值相差较大, 对市区浓度日变化的预报效果也比较差。形成的原因是多方面的, 主要原因有两个方面: 一方面, 我们只考虑了 TSP 的工业源, 没有考虑其他污染源的贡献, 并且也没有考虑工业源的日变化; 另一方面, 我们在城市空气污染预报模式中没有考虑 TSP 的粒谱及其相应的物理化学过程, 而仅仅考虑了

TSP 的输送与扩散过程。

4 讨论

城市 TSP 的来源是非常复杂的, 有的来自工业燃料燃烧、工业窑炉和生产性粉

尘, 有的来自民用燃料燃烧和二次扬尘。TSP 来源的复杂性给接收点模式带来了许多不确定性。TSP 的预报结果与污染源密切相关, 所以在今后的预报工作中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。同时应提高监测数据的质量, 使监测结果正确、合理。

参 考 文 献

- 1 戴树桂, 天津市采暖期飘尘来源的解析, 中国环境科学, 1986, 6(4), 24~30.
- 2 王明星, 用因子分析法研究大气气溶胶的来源, 大气科学, 1985, 9(1), 73~81.
- 3 陈宗良, 北京大气气溶胶小颗粒的测量与解析, 环境科学研究, 1994, 7(3), 1~9.
- 4 张美根, 韩志伟, 雷孝恩和佟彦超, 天津市空气污染数值预报实验中的模式系统, 气候与环境研究, 1999, 4(3), 237~243.
- 5 雷孝恩, 张美根, 韩志伟等, 大气污染数值预报基础和模式, 北京: 气象出版社, 1998.
- 6 中国科学院大气物理研究所, 空气污染数值预报模式系统, 北京: 气象出版社, 1999.

Numerical Simulation of TSP Concentration Distribution in Tianjin

Zhang Meigen, Han Zhiwei and Lei Xiaoen

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

Abstract Based on the observed data of TSP concentration in Tianjing, the contribution of various sources, e.g., soot of coal combustion, dust of construction site, marine aerosol, to the TSP concentration of observational point is quantitatively analyzed by using quality balance method of chemical elements. The method applied to forecasting TSP concentration in the numerical air pollution forecast experiment of Tianjing and its results are introduced briefly.

Key words: total suspended particulates; air pollution; forecast