

南京信息工程大学

---

硕士学位论文

---

银川市空气污染特征分析及其预报方法的研究

---

姓名：孙银川

---

申请学位级别：硕士

---

专业：气象学

---

指导教师：缪启龙;桑建人

---

20070101

# 银川市空气污染预报方法的研究

## 摘 要

本文通过对银川市 2001~2005 年的空气质量现状、污染气象条件和各类污染物的时空分布等特征的分析,定量地揭示了银川市大气污染物变化规律,并在此基础上建立了空气质量的数值、动力统计和多元线性回归预报模型。结果表明:

1. 银川市年主导风向为偏北风,夏季以南风为主,秋末到来年春季则盛行偏北风。一天中大部分时次偏北、偏南风出现频率较高,而偏东、偏西风出现频率相对较低。静风频率秋冬季节较高,春季最低。一天中静风多出现在早晨,午后出现几率最小;

2. 银川市一年中大气稳定度以中性及稳定类为主,不稳定类天气易出现在夏季,而秋冬季节多出现稳定类天气;

3. 主要污染物高污染时段均出现在早晨和夜间。 $PM_{10}$ 、 $SO_2$  污染早晨高于傍晚, $NO_2$  污染则正好相反。 $PM_{10}$  污染春季最强, $SO_2$ 、 $NO_2$  污染冬季最强, $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$  三夏季污染均最轻。 $SO_2$  污染采暖期是非采暖期的 4 倍以上,进一步说明了采暖和生活燃煤是银川市  $SO_2$  的主要发生源;

4. 银川市自然降水对大气清洁的贡献作用非常明显。在统计时段内,平均一次过程将直接减轻  $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$  污染分别达 31%、34%和 35%。在各类沙尘天气过程中,浮尘天气导致  $PM_{10}$  污染最重,扬沙天气次之,沙尘暴天气相对较轻;

5. 动力统计模式在银川市空气污染预报中效果最为显著,弥补了数值预报和纯数理统计预报模式的不足。CAPPS 数值模式与多元线性回归模式各有优缺点,对于气体污染物 ( $SO_2$ 、 $NO_2$ ) 数值模式的相对误差小于多元回归模式,相应的级别预报准确率也较高于多元回归模式;而对于颗粒污染物 ( $PM_{10}$ ),数值模式的预报能力较弱于多元回归模式;

6. 动力统计模式中的预报因子是从大气扩散方程出发推导简化而来的,既考虑了气象条件的作用,又考虑了起报日污染物浓度的作用,与纯数学统计预报方法相比,有着更加可信的物理基础;与数值模式相比,动力统计预报模式不需要污染源强排放清单,具有简便易行的优点。在动力统计模式中用前差分格式代替大气污染物平均浓度随时间变化的微分项,其好处在于可用起报日气象要素和污染物浓度实况来预测污染物浓度变率,从而避免了二次预报带来的误差。

**关键词:** 银川市, 空气污染, 污染气象条件, 数值预报, 动力统计, 多元线性回归

## Abstract

### **A study on the method of air pollution forecast in Yinchuan City**

This dissertation analyses the air quality present situation, air pollution-meteorology condition and each kind of pollutant characteristic space-time distribution in Yinchuan city during 2001-2005, promulgating the quota or Yinchuan air pollutant change rule, and has established the air pollution model of numerical forecasting, dynamic-statistics and multiple linear regression analysis in this foundation. The results show that:

1. The Yinchuan City year-leadership wind direction is the leaning north wind, summer primarily will lead the wind direction by the south wind, and it is leaning north wind at the end of the fall to the next spring;

2. In a year, the Yinchuan city atmospheric stability by the neutrality and the stable kind primarily, the unstable kind of weather is easy to appear in the summer, but in the fall to winter season it is easy to appear the stable kind of weather;

3. The high pollution time interval of main pollutant appears in the morning and night. PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> pollution morning is higher than the evening, the NO<sub>2</sub> pollution then just right is opposite. The PM<sub>10</sub> spring pollutes strongly, SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> winter pollution is strongest.

4. The natural precipitation is extremely obvious to the atmospheric clean contribution function. In each kind of sand dust weather process, the floating dust weather causes PM<sub>10</sub> to pollute heavily, raises the sand weather to be next, the sand storm weather relative is lighter;

5. The the forecast effect of dynamic-statistics pattern in the Yinchuan air pollution is most remarkable, has made up the numerical forecasting and the pure mathematical statistic forecast pattern insufficiency. Regarding the gas pollutant (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>) the value pattern relative error is smaller than multiple linear regression analysis. But the pellet pollutant (PM<sub>10</sub>), the numerical pattern forecast ability weaker than the multiple linear regression pattern ;

6. In the dynamic-statistics pattern predictor both has considered the meteorological condition function, and the pollutant density function. Compares with the pure statistical forecast method, it has the more credible physical foundation. And compares with the numerical pattern, the dynamic-statistics forecast pattern does not need the source of pollution strongly to discharge the detailed list, so it has the simpleness merit.

**Key Words:** Yinchuan City; Air Pollution; Numerical pattern; dynamic-statistics model; Multiple linear regression analysis

# 第一章 引言

环境与发展,是当今国际社会普遍关注的重大问题。在饱经了环境污染对人类的危害之后,人们开始重视环境保护,并着手进行污染事故的预测研究,空气污染预报应运而生<sup>[1]</sup>。空气污染预报分为空气污染气象条件预报和空气污染浓度预报两大类。空气污染气象条件预报又称为空气污染潜势预报,以预报可能影响空气中污染物扩散和稀释的气象条件为主;空气污染浓度预报又称为空气质量预报,是对空气中主要污染物浓度的变化进行科学预测,预报因子涉及到气象状况和污染源参数,其预报方法上又分为统计预报和数值预报两种<sup>[2]</sup>。本文在分析与空气污染关系密切的各类气象条件的基础上,建立了银川市空气污染预报系统,同时对其预报效果进行了积极的探讨。

## 1.1 空气污染预报研究及实施的目的和意义

目前,我国经济正处在高速发展期,能源需求不断增大、交通快速发展、城市人口迅猛膨胀以及大型工业开发区的建设等人为活动使污染物排放总量在不断增加,以PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>等为主要污染物的大气环境污染问题直接威胁着国民经济的可持续发展和人民身体健康。近年来,我国各重点城市相继开展了空气质量周报、日报工作,进而对开展空气质量预报的需求日渐显著。如何在创造高度发展的物质文明的同时,保护好我们的自然资源,兼顾环境与效益,合理控制污染物排放,密切监视环境污染变化动态,预防严重污染事件的发生,及时、准确、全面的提供未来大气污染物变化的信息是我们亟待解决的问题。因此,开展空气质量预报工作是十分必要的。

1. 通过空气污染预报的研究可以更清楚、全面地了解 and 掌握空气中污染物的迁移变化规律,以及污染源和气象条件对空气质量的影响<sup>[3~6]</sup>。

2. 开展空气污染预报可以预防严重污染事件的发生,对可能发生的污染事故采取措施,避免或减轻污染危害,促进企业进行工业废气治理,实行清洁生产<sup>[7~10]</sup>。

3. 为政府的管理和决策提供及时、准确和全面的空气质量信息,进而能够有针对性地采取相应的控制和防治措施,减少污染物排放量,减轻对生态系统的影响,为制定空气污染控制计划和措施提供科学依据<sup>[11、12]</sup>。

4. 通过深入分析空气质量的时间变化规律,可为公众的社会活动安排提供参考依据,为市民打开一扇了解空气质量的窗口,提高了广大群众的环境自我保护意识。

5. 开展城市空气质量预报是一个城市文明程度的标志,良好的城市空气质量是城市可持续发展的珍贵资源,有利于提高城市的知名度,吸引各方投资,由此将带来无法估量的经济效益。

## 1.2 国内外空气污染预报发展概况

### 1.2.1 国外空气污染预报情况

国外对空气污染预报的研究起步于上个世纪60年代。一些工业发达国家，已采用先进的包括边界层气象资料在内的大气质量实时动态监测系统，以利于开展空气污染浓度预报和空气污染潜势预报，为当地政府提供决策依据。对可能出现的空气污染提前采取措施，如通知工厂限产，限制车辆行驶数量，让人们减少户外活动等。各国在空气污染预报中按本地区具体情况确定项目，以 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{CO}$ 为主，同时监视灾害性的大面积酸雨、光化学烟雾事件的发生<sup>[13, 14]</sup>。

美国、欧洲等发达国家在上个世纪中期就开始利用空气实时动态监测系统来开展污染预报，协助国家和地方环境主管部门采取措施以削减、控制污染物排放量，防止、减少污染事件的发生。美国国家气象局根据天气预报的风、涡度及天气状况、大气稳定度、混合层高度等气象因子，用数值预报模式，对污染源进行未来24小时的扩散计算，从而做出空气污染预报<sup>[17, 18]</sup>。

德国国家和地区空气监测网络，通过计算机系统可迅速、自动地与其它监测站及网络的中心交换数据，对各监测站的监测结果及相邻网络提供的空气污染物越境传输的信息，结合气象预报系统，能够提供污染的早期预警和预报分析，最终可协助环境保护机构采取措施削减排放量，减少污染事件的发生。

1988年12月，日本为了加强防治日趋严重的汽车尾气污染，决定对污染严重的大阪、东京地区的 $\text{NO}_x$ 进行污染预报，其形式为在每日上午的新闻中发布前一日的污染状况和当日预报结果。而当空气污染超过规定的警报水平时，大气自动监测系统向新闻媒介发出污染警报。其旨在呼吁社会各界对政府的污染防治计划给合作<sup>[19]</sup>。

荷兰于1989年开始在部分地区进行空气质量预报，1992年已能够在全国范围以日均浓度水平发布空气污染预报，冬季预报 $\text{SO}_2$ 和 $\text{PM}_{10}$ ，夏季预报 $\text{O}_3$ 的浓度，并开发研究多种预报技术方法，预报周期从几小时到2~3天<sup>[16]</sup>。

法国政府十分重视对空气污染的控制，1997年3月11日颁布了一旦空气质量达到三级警报程度的有效措施及相应的优惠政策，主要内容包括：在巴黎及其近郊区域汽车分单双日行驶；对所谓“零污染”汽车发放绿卡；压缩工业生产；加强空气污染监测，特别是汽车尾气监测，对超标车就地停驶；与此同时，在空气污染严重而实行管制时，实行公交车免费，住宅区免费停等。

近几年，丹麦国家环境研究所开发了一套基于数值模式的空气污染预报系统——THOR模式。该模式可制作未来三天的空气污染预报，每天预报两次，预报因子为 $\text{O}_3$ 和 $\text{NO}_2$ ，预

报范围是整个欧洲大陆和丹麦,该模式由气象模式和城市背景模式组成。另外,韩国、墨西哥等国家也利用其空气监测网络发布空气污染警报。

### 1.2.2 国内空气污染预报的情况

从1973年第一次全国环保工作会议开始,我国陆续在大气扩散模式、污染气象学、污染气象参数与污染浓度之间的关系以及空气污染预报等方面进行了研究<sup>[19~23]</sup>,并先后在北京、沈阳、兰州、太原、长沙等城市初步开展了以SO<sub>2</sub>为主的城市空气污染试验预测和预报研究工作<sup>[24、25]</sup>。1997年6月中国环境监测总站分批组织46个环保重点城市开展空气质量周报,并于1998年1月1日起,陆续在中央电视台、中国环境报、中央人民广播电台等新闻媒体上向社会公众公布。2000年6月5日,又组织42个重点城市开展了空气质量日报,并且从2001年6月5日开始,中国环境监测总站和中国气象局在中央电视台联合发布47个环境保护重点城市的空气质量预报。空气质量预报工作的实施为在我国全面建立大气污染预警系统迈出了重要的一步。

我国空气污染预报的发展可以简略地概括为:60年代初,开始出现的区域尺度空气污染气象条件预报(潜势预报),主要预报可能导致空气污染的特殊天气形势和气象状况;自60年代末逐渐开展空气污染浓度的条件方法研究;几乎与统计预报方法同时出现了空气污染浓度预报的半经验数值模型,如基于质量守恒定律的箱模型以及基于湍流扩散统计理论的高斯模型、萨顿模型;自70年代后期迅速发展起来的基于大气物理—化学过程耦合的动力学数值模型,随着大气化学分析技术及计算机技术的快速发展,该方法日渐成为大气污染预报的主要手段<sup>[26~28]</sup>。

国内许多学者在城市空气质量预报模式方面做了大量工作,张美根、雷孝恩等人<sup>[29、30]</sup>的城市污染数值预报模式系统和气象科学研究院徐大海、朱蓉<sup>[31~33]</sup>建立的城市空气污染数值预报系统(CAPPS),是用有限体积法对大气平流扩散方程积分得到的多尺度箱格预报模型,与中尺度数值预报模式嵌套构成的城市空气污染数值预报系统。陈万隆<sup>[34]</sup>,佟华等<sup>[35]</sup>发展了空气污染准业务数值模式,是将修改过的二维Mass<sup>[36]</sup>风场模式根据实测风廓线推广到三维,用有限元法求解欧拉平流扩散方程预报SO<sub>2</sub>指数和浓度分布,经检验预报效果好。

近年来,省级气象部门和环保部门在空气污染物的来源解析、分布特征等方面做了大量的工作,李兰等人<sup>[37]</sup>研究表明污染物浓度与气象要素的关系有着明显的季节变化规律。康晓风<sup>[38]</sup>分析了城市中可吸入颗粒物的不同来源,根据对沙尘天气发生过程的监测,以沙尘影响指数的概念明确了沙尘天气与空气质量的关系。赵庆云、张武等人<sup>[39]</sup>利用污染物浓度和能见度观测资料,对大气能见度及环流特征量进行了分析,得出了亚洲地区环流径向度增大时,大气能见度增加,空气污染程度较轻的结论。另外,还有许多专家、学者对污染气象条件做

出了全面的分析，详细地研究了大气污染的主要因素及近地层大气污染物聚散的物理过程，使我们比较清楚地了解到形成高浓度污染的各类天气条件<sup>[40-41]</sup>。

基于上述研究，各省气象部门在空气质量预报方法方面也取得了长足的进展。秦保平等<sup>[62]</sup>采用ETA模式、M-β模式和高分率对流层化学模式（HRCM）建立了天津市空气质量数值预报系统。尚可政、王式功等<sup>[63]</sup>从空气污染扩散方程出发，经过简化推导，得出兰州市污染预报动力统计模型的数学形式。北京市气象局的均生函数预测模型不但可以很好地拟合空气污染浓度的变化趋势，而且还能够对未来几个月的空气污染浓度做出较准确的预测<sup>[64、65]</sup>。上海市气象局空气质量综合预报系统集成了CAPPS、K模式等数值预模型，并结合自行开发的分类统计方法和神经网络预报模型，取得了较好的预测精度。辽宁省气象科研所建立的污染预报业务系统中包括潜势预报、统计预报和数值模式预报3种方法。江西省气象科学研究所引进美国（NAC）第四代中尺度预报模式，在全省主要城市开展了空气洁净指数（ACI）及空气污染总体指数（PSI）的预报<sup>[66]</sup>。其它省气象部门还采用了EOF、模糊识别理论等数学方法进行空气质量预报，并取得了较好的预测效果<sup>[67、68]</sup>。

### 1.3 研究问题的提出

随着西部大开发战略的实施，银川市将经历异常迅猛的城市化进程。银川不仅是一座具有 1300 多年历史的文化古城，还是宁夏回族自治区的首府和全区政治、经济、文化中心和交通枢纽。银川市由于独特的地理位置和悠久的历史，其环境质量备受世人关注。2001 年宁夏气象局在引进徐大海的 CAPPS1.0 的基础上初步开展了首府城市空气质量预报工作，随着污染物观测资料的积累和技术方法的提高，全面、细致地研究银川市空气主要污染物的分布特征、污染气象条件及空气质量预报方法等的意义非常重大，不仅可促进银川市环境保护工作的有序开展，满足公众对环境质量日益增长的需求，而且还为宁夏其它重点城市开展空气质量预报工作打下良好的基础。

本文通过对银川市近 5 年来的空气质量现状、空气污染气象条件，以及各类污染物的时空分布规律等进行全面、系统的分析、评价，达到科学、客观、定量地揭示银川市大气污染物变化规律的目的。通过建立“银川市空气质量综合预报系统”，为环境管理和决策部门及时、准确、全面地掌握城市环境空气质量现状及变化趋势提供了科学依据，可以在严重污染日到来之前，有针对性地加大污染源控制，及时发出警报并采取限制措施，减轻对生态系统的影响。

## 第二章 资料、研究方法及技术路线

### 2.1 资料说明

1. 银川市三个大气质量自动监测站（兴庆区的师范学校、金凤区的水产研究所和西夏区的长城铸造厂）的空气主要污染物（大气可吸入颗粒物  $PM_{10}$ 、二氧化氮  $NO_2$ 、二氧化硫  $SO_2$ ）日均浓度监测值 ( $mg/m^3$ ) 及其 API 指数计算值，取自银川市环境监测中心站。其中师范学校资料样本时间范围为 2001~2005 年；水产研究所和长城铸造厂因建站时间较晚，其资料样本时间范围均为 2004~2005 年；

2. 污染源资料来自于 2004 年宁夏环境统计年报；

3. 银川市近 30 年气象资料为 2001~2005 年银川国家地面气象基准站气温、气压、相对湿度、降水量、总云量、低云量、风向风速及扬沙浮尘等逐日观测资料；

4. 每日 08 时和 20 时探测的地面和 850hpa 到 100hpa 各规定层等压面上的温、压、湿和风资料来自 MICAPS 系统中的  $Un^*$ 、 $Ux^*$ 、 $Sn^*$  及  $Sx^*$ ；

5. 每日东北半球 T213 源码文件共有 603 个，包括位势高度、温度、相对湿度、风的 U 分量和 V 分量，以及地面温度、地面气压和海平面气压。其中位势高度、温度、风的 U 分量和 V 分量各有 126 个源码文件，包括 14 个高度层（1000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50hpa）和 9 个时次的预报场（分析场、6、12、18、24、30、36、42、48 小时）；相对湿度有 72 个源码文件，包括 8 个高度层（1000、925、850、700、600、500、400、300hpa）和 9 个时次的预报场；地面温度、地面气压和海平面气压分别有 9 个源码文件，包括 9 个时次的预报场。

### 2.2 研究方法

表 2.1 太阳辐射等级数

| 云量, 1/10         | 太阳辐射等级数 |                     |                                |                                |                  |
|------------------|---------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|
|                  | 夜间      | $h_0 \leq 15^\circ$ | $15^\circ < h_0 \leq 35^\circ$ | $35^\circ < h_0 \leq 65^\circ$ | $h_0 > 65^\circ$ |
| $\leq 4/\leq 4$  | -2      | -1                  | +1                             | +2                             | +3               |
| 5~7/ $\leq 4$    | -1      | 0                   | +1                             | +2                             | +3               |
| $\geq 8/\leq 4$  | -1      | 0                   | 0                              | +1                             | +1               |
| $\geq 5/5\sim 7$ | 0       | 0                   | 0                              | 0                              | +1               |
| $\geq 8/\geq 8$  | 0       | 0                   | 0                              | 0                              | 0                |

#### 2.2.1 帕斯奎尔 (Pasquill) 稳定度分类法

Pasquill 稳定度分类法认为，近地层大气的热状况在相当大程度上取决于地表面的加热

和冷却过程。因此，可以用太阳高度角、云量（总云量、低云量）和风速来判断大气稳定度。Pasquill 稳定度分级法分为六类，即强不稳定、不稳定、弱不稳定、中性、较稳定和稳定，并分别以 A、B、C、D、E 和 F 表示。分类时，首先由云量与太阳高度角按表 2.1 查出太阳辐射等级，再由太阳辐射等级与地面风速按表 2.2 查找稳定度等级。

云以不同高度分为低云和高云，总云量即为低云量和高云量之和，云又以十等份来划分覆盖天空的量，一般认为总云量 < 4 即为晴天，总云量 > 8 即为阴天。

表 2.2 大气稳定度的等级

| 地面风速/m. s <sup>-1</sup> | 太阳辐射等级 |     |    |   |    |    |
|-------------------------|--------|-----|----|---|----|----|
|                         | +3     | +2  | +1 | 0 | -1 | -2 |
| ≤1.9                    | A      | A~B | B  | D | E  | F  |
| 2~2.9                   | A~B    | B   | C  | D | E  | F  |
| 3~4.9                   | B      | B~C | C  | D | D  | E  |
| 5~5.9                   | C      | C~D | D  | D | D  | D  |
| ≥6                      | C      | D   | D  | D | D  | D  |

太阳高度角  $h_0$  使用下式计算：

$$h_0 = \arcsin [\sin \varphi \sin \sigma + \cos \varphi \cos \sigma \cos(15t + \lambda - 300)]$$

式中， $h_0$  为太阳高度角，deg； $\varphi$  为当地地理纬度，deg； $\lambda$  为当地地理经度，deg； $t$  为进行观测时的北京时间； $\sigma$  为太阳倾角，deg，可按下式计算：

$$\begin{aligned} \sigma = & [0.006918 - 0.39912 \cos \theta_0 + 0.070257 \sin \theta_0 \\ & - 0.006758 \cos 2\theta_0 + 0.000907 \sin 2\theta_0 \\ & - 0.002679 \cos 3\theta_0 + 0.001480 \sin 3\theta_0] \times 180/\pi \end{aligned}$$

其中， $\theta_0 = 360 \times d_n / 365$ ，deg； $d_n$  为一年中的日期序数，0、1、2、...、364。

### 2.2.2 用国标法计算大气混合层厚度

国标法为国家标准 GB / T13201 中附录 B 及附录 E 中规定的方法<sup>[69]</sup>。该方法实质上认为近地层大气的热状况在相当大的程度上取决于地面的加热和冷却程度，它直接利用我国地面常规气象观测资料，综合考虑了热力和动力因子，把太阳高度角，云量（总云量 / 低云量）和风速分级定量化，对大气稳定度分类，再由下式计算出混合层厚度：

$$H = a_0 \times u_{10} / f \quad \text{当大气稳定度为 A、B、C、D 级时}$$

$$H = b_0 \times \sqrt{u_{10}/f} \quad \text{当大气稳定度为 E、F 级时}$$

其中， $H$  为混合层厚度；

$u_{10}$  为 10 m 高度处平均风速，大于 6 m/s 时取为 6 m/s；

$a_0$ 、 $b_0$  为混合层系数， $a_0$  取值和稳定度对应分别为 A: 0.073, B: 0.048, C: 0.031, D: 0.022,  $b_0$  取值和稳定度对应分别为 E: 1.66, F: 0.70；

$f$  为地转参数， $f = 2\Omega \sin \varphi$ ， $\Omega$  为地转角速度，取为  $7.29 \times 10^{-5}/s$ ， $\varphi$  为观测点地理纬度。

### 2.2.3 数据标准化处理

由于在本论文中研究的空气污染物  $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$  浓度与气温、降水、相对湿度等的值域区间相差较大，为了避免大值对小值的掩盖，首先要对原始数据进行标准化处理，所谓标准化处理即产生数据集：

$$\left\{ X_j \mid X_j = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \right\}$$

其中， $X_j$  为标准化后数据； $X_i$  为原始数据；均值  $\bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i/n$ ， $n$  为样本数；均方差

$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / n - 1}$ 。该数据集是均值为  $\bar{X}$ ，均方差为  $\sigma$  的正态分布。

## 2.3 技术路线

本文在银川市空气质量预报方法的研究中，除了进行统计学预报方法的研究和应用外，还探讨了数值预报方法及动力学与统计学相结合的研究和应用，有利于预报结果的对比较证。技术路线见图 2.1：

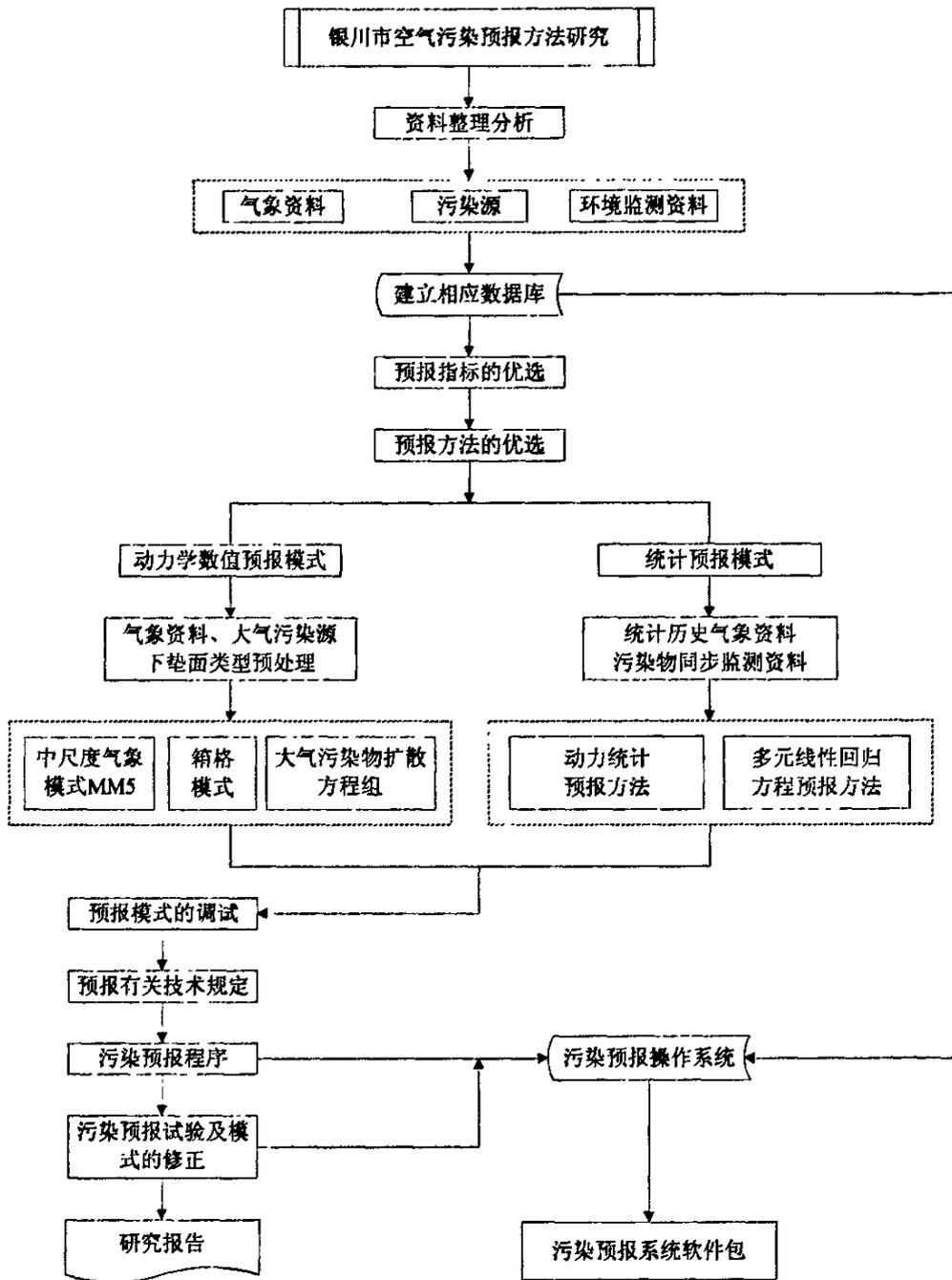


图 2.1 银川市空气污染预报研究的技术路线图

## 第三章 银川市自然环境状况及污染气象条件分析

### 3.1 宁夏环境状况存在的问题

“十五”期间，宁夏环境质量整体有所改善，尤其是重点流域、重点城市、重点区域的环境质量明显改善，环境保护事业得到一定发展，但由于种种原因，目前环境保护体制、机制方面的深层次问题还有待解决，结构性污染问题仍然十分突出并有所发展，环境治理任务还相当艰巨。

宁夏多数企业污染治理资金不足，特别是经济、社会活动密度大、能源和资源消耗高的地区，环境污染问题仍比较严重。在重点城市环境质量有所好转的同时，一些小城市或区域污染有所加重。燃煤量快速增长与脱硫、减硫设施建设进展缓慢的矛盾日益突出，与此同时，造纸、化工、电力、冶金、建材等环保重点行业将继续发展。从一定意义上讲，环境保护的压力将进一步加大。同时，从指导思想和工作实践的情况看，部分地区还未真正将环境保护纳入经济、社会整体规划，“重项目，轻环保”，环境监管力度小。建设项目环保“三同时”（三同时指建设项目需要配套建设的环境保护设施，必须与主体工程同时设计，同时施工，同时投产使用<sup>[64]</sup>）制度的执行率很低，部分企业没有环保设施就擅自投入生产，直排污染物的现象时有发生。有的虽然建成了治理设施，但受利益驱动，存在偷排、暗排行为，不能确保长期、稳定达标排放，这些都直接造成了宁夏环境质量的不稳定。

### 3.2 银川市地理位置及行政区划

银川市是宁夏回族自治区的首府，位于黄河上游宁夏平原中部，是一座历史悠久、风光秀丽的塞上古城。东临黄河，与内蒙古鄂托克前旗毗邻；西依贺兰山，与内蒙古阿拉善盟为邻。地域范围为北纬  $37^{\circ} 29' \sim 38^{\circ} 53'$ ，东经  $105^{\circ} 49' \sim 106^{\circ} 53'$ ，南北长 82 公里，东西宽 64 公里，全市行政区划面积约为 3511.6 平方公里。市内地势平坦、开阔，西部、南部较高，北部、东部较低，略呈西南—东北方向倾斜，平均海拔在 1010～1150 米之间。主要土壤类型有灰钙土、潮土、灌淤土、盐土、沼泽土、白僵土、风沙土、灰褐土等。银川市沃野百里，沟渠纵横，是西北有名的“鱼米之乡”。全市植被以草原为主，主要树种有杨树、榆树、柳树、沙枣树、槐、山杏、油松等，森林覆盖率 11.5%。目前银川市辖兴庆区、金凤区、西夏区三区以及灵武市、永宁县、贺兰县。

### 3.3 银川市气候主要特点

银川深居中国西北内陆，属中温带大陆性气候，四季分明，冬寒漫长但不奇冷，夏暑较短但无酷热，具有春暖快、秋凉早、雨雪稀少、气候干燥、日照充足、气温日较差大及风大沙多等气候特点。全年无霜期 150～170 天，太阳辐射强，年均日照时数高达 2000～3000

小时，是全国太阳辐射和日照时数最多的地区之一。年平均气温在 9℃ 左右。夏季气温最高时达 30℃ 以上，但时间一般不长。寒流自 10 月抵达，至第二年 3 月止，历时达半年之久。最冷的 1 月平均气温接近 -8℃，极端低温在 -27℃ 以下。雨季多集中在 6~9 月，年降水量不多，一般在 150~200 毫米之间，地表水源充足，“绿洲效应”显著，空气相对湿度保持在 50%~60% 左右。

### 3.4 银川市污染气象条件分析

气象条件是决定大气污染状况的一个关键因素，它是污染物稀释、扩散及相互作用的动力。本文选取银川市 2001 年至 2005 年逐日具有代表性的时次 02 时、08 时、14 时、20 时常规气象资料，较全面地了银川市的空气污染气象特征。

#### 3.4.1 银川市地面风场特征

风速的大小和大气稀释扩散能力存在着直接的对应关系，风速越小则对污染物稀释扩散不利；而风向与污染的关系主要表现为风对污染物的水平输送作用，污染浓度的高值区常出现在污染源的下风方。

##### 1. 风速

为统计方便，我们将风速分为 5 个等级：0.0~1.9m/s、2.0~2.9m/s、3.0~4.9m/s、5.0~5.9m/s、≥6.0m/s，分别用 1、2、3、4、5 来代表。

##### (1) 风速的年平均特征

从年平均情况来看(见图 3.1)，统计年份内最大频率风速段为 2 级，其频率为 36.5%；3 级风速频率次之，为 34.8%；1 级风出现频率居中，为 20.1%；4、5 级风出现机率较小，分别为 4.2%、4.4%。由此可知，银川市年平均风速主要集中在 2.0~4.9m/s 之间，占各风速级别的 7 成以上。

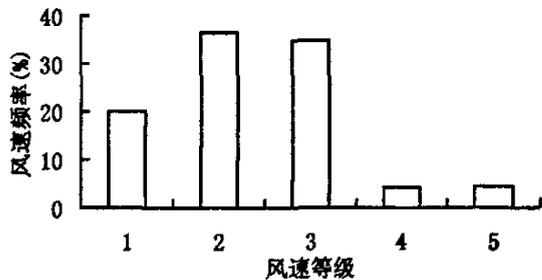


图 3.1 银川市近 5 年年平均各风速段频率分布图

##### (2) 风速年变化

由图 3.2 可知，秋冬季节各月，最大频率风速段为 2 级风，其频率为 36.9~42.6%，次大频率段为 3 级，其频率为 27.0~31.5%。春夏季各月，最大频率风速段为 3 级，频率高达 37.9~44.5%，其次是 2 级，频率为 29.3~36.9%。

从不同风速段分布状况看，1 级、2 级风秋冬季节出现频率较高，峰值分别出现在 12 月、9 月，频率为 31.2%、43.2%，春夏季出现频率较小，极小值分别出现在 5 月和 4 月，频率为

11.3%、29.3%。3级风春夏季出现频率较高，峰值出现在6月份，频率达44.5%，秋冬季频率较小，极小值出现在12月份，频率为21.8%。而4、5级风春季至夏初出现频率相对较大，峰值分别出现在5月和4月，频率为8.6%、9.8%，其次是秋末（11月），频率分别为4.4%、5.8%，最小频率出现在9月份，仅为1.5%、1.8%。

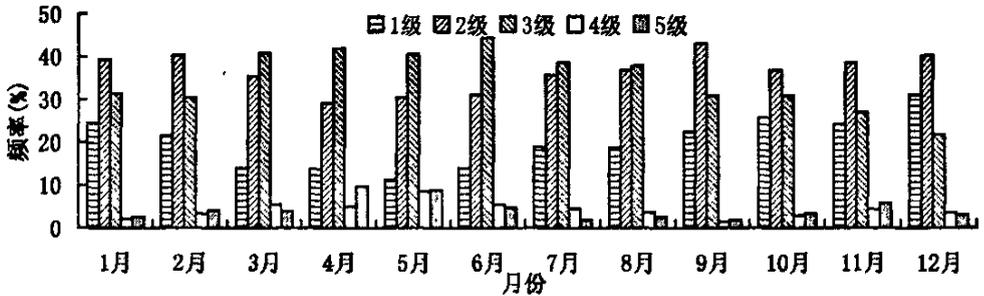


图 3.2 各风速段出现频率

### (3) 风速日变化

表 3.1 各时次各级风出现频率 (%)

| 风速等级 | 1    | 2    | 3    | 4   | 5   |
|------|------|------|------|-----|-----|
| 02时  | 24.0 | 38.0 | 31.9 | 3.8 | 2.5 |
| 08时  | 27.2 | 37.0 | 30.4 | 3.0 | 2.5 |
| 14时  | 10.8 | 29.8 | 44.2 | 6.7 | 8.6 |
| 20时  | 18.6 | 41.5 | 32.6 | 3.5 | 3.9 |

由表 3.1 可知，1、2级风出现频率峰值分别出现在08时、20时，次高值出现在02时，最小频率出现在14时。3、4、5级风频率分布与1、2级基本相反，峰值均出现在14时，其它时次无明显差异。这是因为早晨及傍晚大气相对稳定，乱流作用弱，风速较小，午后大气热力乱流作用增强，风速增加。

## 2. 风向

### (1) 风向的年平均特征

由图 3.3 可知银川市一年中以偏北风出现频率最高，西北偏北风 (NNW)、北风 (N)、东北偏北风 (NNE) 累计出现频率为 32.0%，其中西北偏北风主导风向，其频率为 12.2%，次主导风向是北风，频率为 10.1%。而偏西风出现频率较小，西南偏西风 (WSW)、西风 (W)、西北偏西风 (WNW) 累计出现频率仅为 6.1%，其中西风频率最小，为 1.3%。近 5 年静风频率为 8.1%。

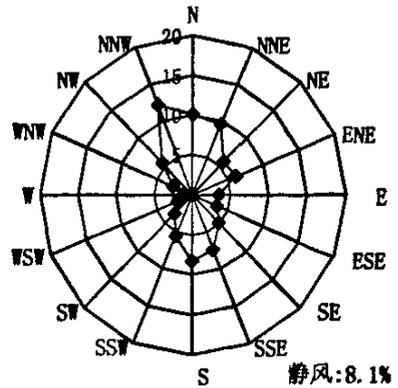


图 3.3 银川市各风向出现频率 (%)

### (2) 风向年变化

分析风向的年变化发现(图 3.4、3.5),银川市自秋末到春季(当年 11 月~次年 4 月)多维持偏北风,西北偏北风(NNW)为主导风向,出现频率为 11~17%,次主导风向为北风(N)或东北偏北风(NNE),5 月份主导风向为北风(N),次主导风向转为南风(S);夏季各月(6~8 月)南风(S)变为主导风向,其频率为 12~14%,次主导风向为西北偏北风(NNW);9 月份北风(N)、西北偏北风(NNW)、南风(S)出现频率相当,而 10 月份东北偏北风(NNE)、西北偏北风(NNW)、南风(S)出现频率相当,故 9、10 月份主导风向不明显。

### (3) 风向日变化

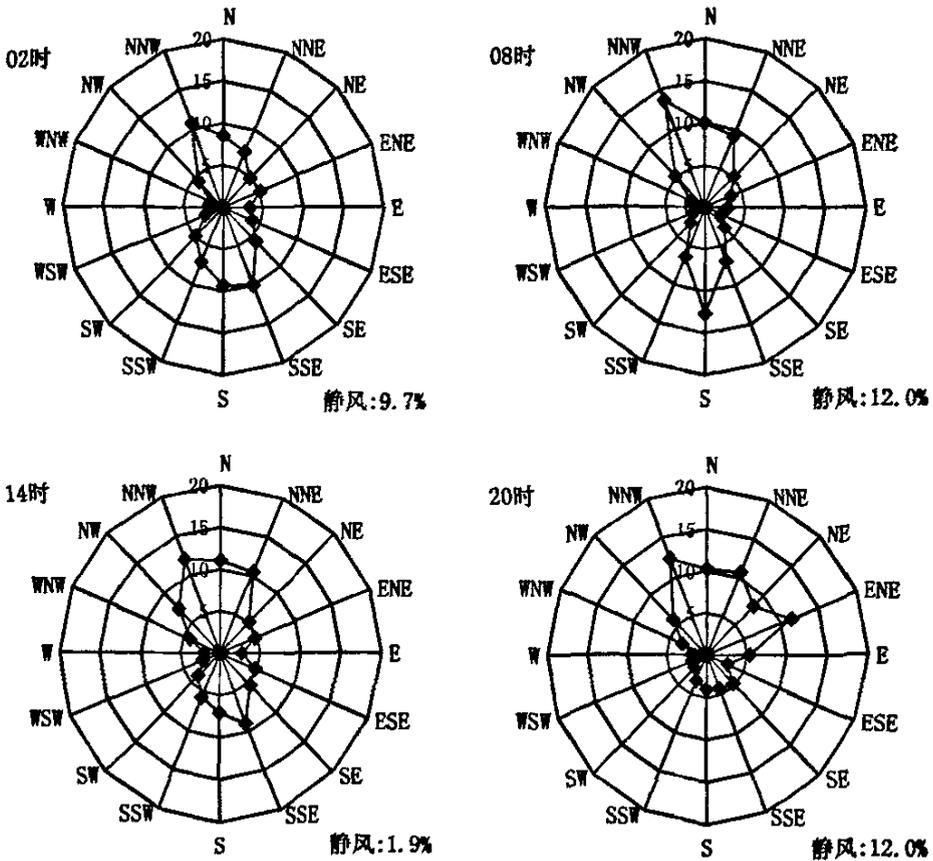


图 3.6 银川市各时次风向频率(%)

由图 3.6 可以清楚的看出,银川市大部分时次偏北风、偏南风出现频率相对较高,而偏东风、偏西风出现频率相对较低。各时次主导风向均为西北偏北风(NNW),出现频率为 10.8~13.7%,次主导风向各不相同,02 时为东南偏南风(SSE)、08 时为南风(S)、14 时转为北风(N),而 20 时则为东北偏东风(ENE)。

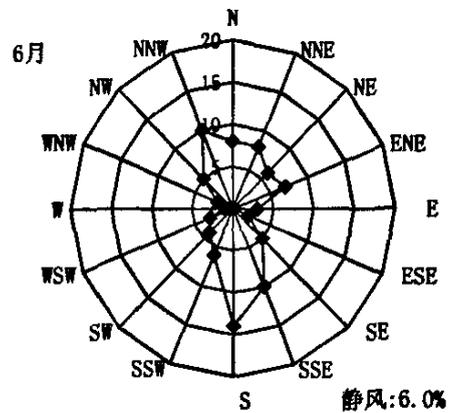
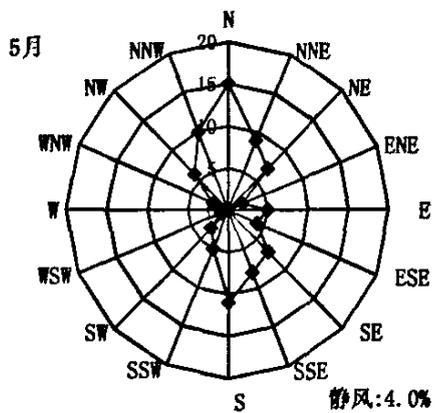
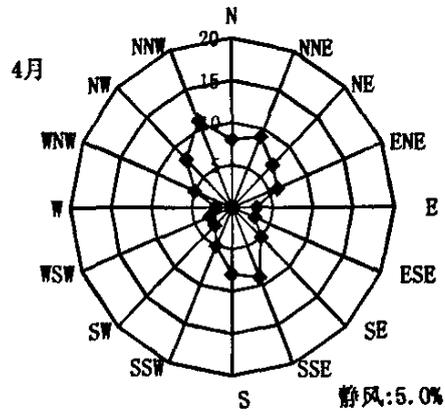
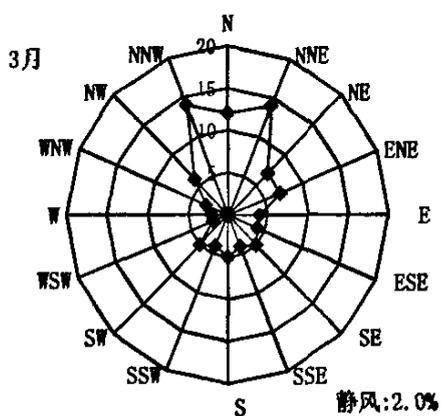
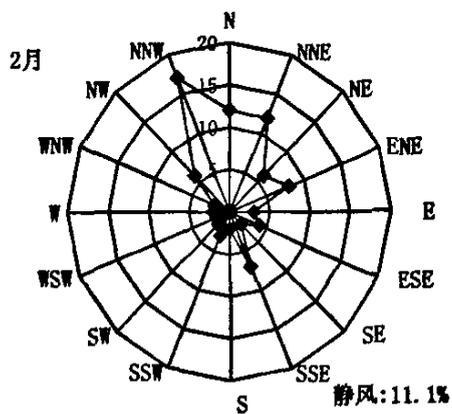
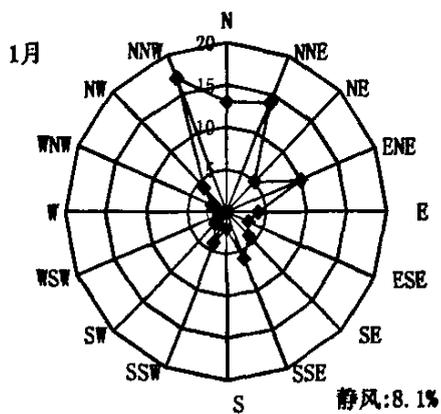


图 3.4 银川市 1~6 月份各风向频率(%)

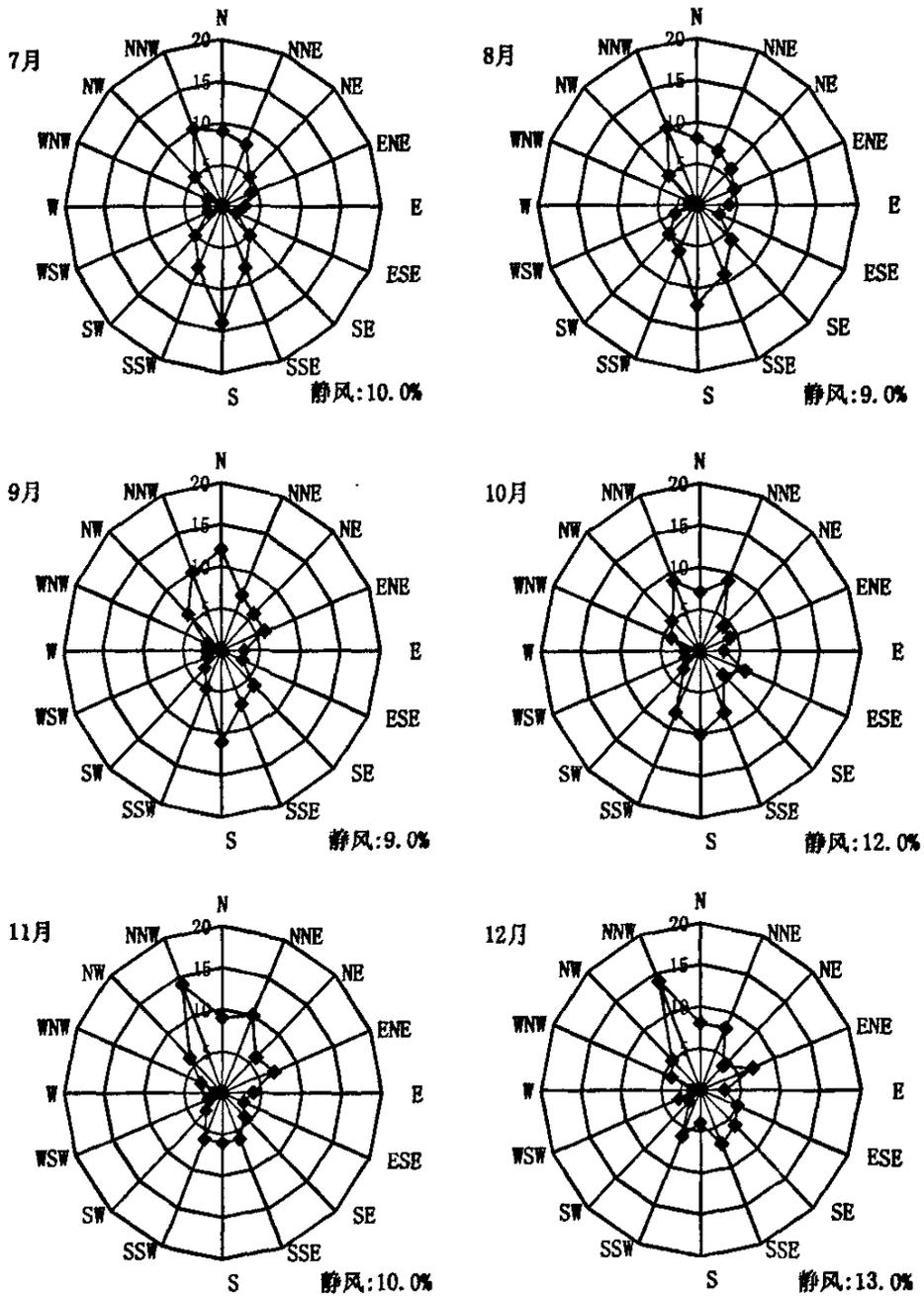


图 3.5 银川市 7~12 月份各风向频率(%)

### 3. 静风频率

不论其它气象条件如何，静风总是造成一个城市或工业区大范围空气污染的重要因素。在空气质量评价中，静风资料是“最不利气象条件”分析的重要依据。

银川市一年中静风频率出现频率为 8.1%。出现频率最高的是 12 月份，为 13%，其次是 10 月，为 12%，3 月份静风频率最小，仅为 2%（图 3.7）。

从静风出现的日变化情况来看（图 3.6），银川市静风频率在早晚时刻（08、20 时）出现最高，达 12%，尤其是 12 月份 08 时静风频率高达 19.5%；其次是 02 时，为 9.7%；最小频率是午后 14 时，仅为 1.9%，而在统计时段内 5 月、6 月份 14 时静风频率为 0。由此可知，银川市在夜间最易造成空气污染。

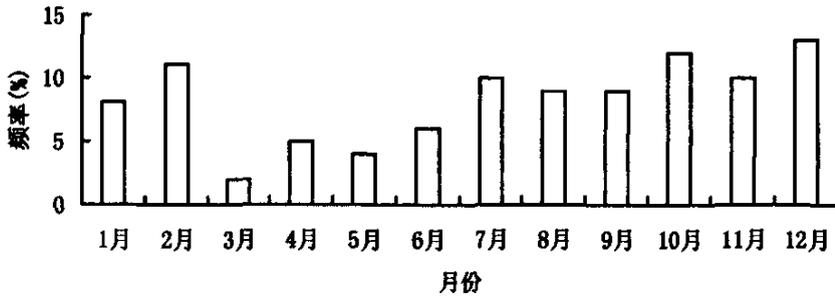


图 3.7 银川各月静风出现频率 (%)

#### 4. 污染系数

为了综合表示风向、风速对污染物的水平输送和稀释扩散的影响，特引进污染系数的概念，其数学表达式为： $a_i = f_i / u_i$

式中， $a_i$  为各风向下的污染系数； $f_i$  为各风向出现频率； $u_i$  为各风向下的平均风速； $i = 1, 2, \dots, 16$  表示除静风外的 16 个风向方位。

因此，污染系数表征了某风向下大气污染能力的大小，某方位的风向频率小，风速大，则该方位的污染系数就小，说明该方向的空气污染就轻；反之则可能受到的污染就严重。图 3.8 为银川市近 5 年污染系数年平均分布特征，由此可看出银川市污染系数以 NNW 风向下最大，为 4.8；NNE 风向次之，为 4.0；污染系数最小值在 W 风向上，仅为 0.5。

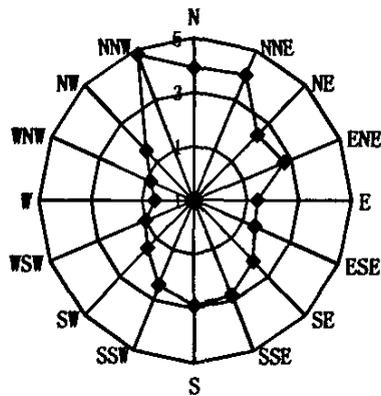


图 3.8 银川市污染系数年平均分布图

表 3.2 给出了银川市近 5 年 1~12 月各风向下的污染系数。可见，各月均在 NNW—N—NNE

风向下污染系数相对较大，即在此风向下风方污染能力最大；而风向在 WSW—W—WNW 时，总体上污染能力相对较弱。

表 3.2 银川市各月污染系数

| 风向  | N   | NNE | NE  | ENE | E   | ESE | SE  | SSE | S   | SSW | SW  | WSW | W   | WNW | NW  | NNW |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 01月 | 5.7 | 7.1 | 2.6 | 5.2 | 1.6 | 1.4 | 1.8 | 2.8 | 0.9 | 1.8 | 1.1 | 0.4 | 0.3 | 0.4 | 1.3 | 7.6 |
| 02月 | 4.8 | 5.0 | 2.8 | 3.4 | 1.4 | 1.4 | 1.1 | 2.8 | 0.8 | 1.5 | 1.0 | 0.3 | 0.7 | 0.4 | 1.9 | 6.3 |
| 03月 | 4.2 | 5.9 | 2.5 | 2.9 | 1.4 | 1.3 | 2.2 | 1.4 | 1.7 | 1.9 | 2.0 | 0.8 | 0.4 | 0.6 | 1.1 | 4.5 |
| 04月 | 2.8 | 3.0 | 2.3 | 2.0 | 1.0 | 1.5 | 1.8 | 3.0 | 2.1 | 1.7 | 0.7 | 1.1 | 0.5 | 1.2 | 1.6 | 3.7 |
| 05月 | 5.1 | 3.3 | 2.5 | 0.8 | 1.9 | 1.8 | 2.7 | 2.6 | 3.2 | 1.8 | 1.3 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 2.0 | 3.9 |
| 06月 | 2.7 | 2.6 | 2.5 | 3.1 | 1.4 | 0.9 | 1.9 | 3.1 | 4.3 | 2.3 | 1.6 | 1.4 | 0.4 | 0.7 | 1.5 | 3.7 |
| 07月 | 3.6 | 3.4 | 1.9 | 1.5 | 1.1 | 0.9 | 2.1 | 2.6 | 4.9 | 3.0 | 2.2 | 0.9 | 0.0 | 0.8 | 1.9 | 4.0 |
| 08月 | 2.9 | 2.9 | 2.5 | 2.3 | 1.8 | 1.2 | 3.0 | 3.1 | 4.4 | 2.6 | 2.2 | 1.8 | 0.6 | 0.4 | 2.0 | 4.1 |
| 09月 | 4.1 | 2.9 | 2.5 | 3.3 | 1.3 | 1.3 | 3.0 | 2.4 | 4.3 | 2.3 | 1.2 | 1.2 | 1.6 | 0.8 | 2.0 | 3.9 |
| 10月 | 3.1 | 3.8 | 2.0 | 2.0 | 1.3 | 3.0 | 2.2 | 3.4 | 3.8 | 3.7 | 1.6 | 0.9 | 0.7 | 1.3 | 1.4 | 3.1 |
| 11月 | 4.2 | 4.8 | 3.2 | 2.9 | 1.8 | 1.1 | 1.7 | 2.9 | 2.2 | 2.9 | 1.4 | 1.1 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | 6.3 |
| 12月 | 3.3 | 3.6 | 1.8 | 3.4 | 1.3 | 2.2 | 2.6 | 3.8 | 2.1 | 3.2 | 1.2 | 2.2 | 0.6 | 1.8 | 1.0 | 6.1 |

### 3.4.2 银川市大气稳定度分布特征

大气稳定度是指整层空气的稳定程度，表示大气对在其中作垂直运动的气团加速、遏制还是不影响其运动的一种热力学性质。当气层受到扰动，若原先是不稳定气层，则扰动、对流和湍流容易发展；若原来是稳定气层，则扰动、对流和湍流受到抑制；若原先是中性气层，则由外界扰动所产生的空气微团运动，既不受到抑制又不能得到发展。因此，大气不稳定，湍流和对流充分发展，扩散稀释能力强。

确定大气稳定度有多种方法，如  $\gamma_d$  法（干绝热法）、 $R_i$  法（理查逊数法）、M-O 法（莫宁-奥布霍夫长度法）、 $\sigma_A$  法（风向标准差法）、 $\Delta T$  法（温差法）、 $U_R$  法（风速比法）、 $L_D$  法（城市稳定度判别法）、Pasquill 法（帕斯奎尔法）以及用烟流形状判断大气稳定度等。

Pasquill 稳定度分级法由于仅用地面常规气象资料来判断大气稳定度，是适合我国国情的方法，也是环境影响评价中常用方法<sup>[65]</sup>。本文利用 Pasquill 法，分析了统计时段内的大气稳定度特征。

#### 1. 稳定度年平均特征

由图 3.9 可见，银川市一年中以中性类 (D) 及稳定类 (E、F) 天气出现频率较高，其中以 D 类频率最高，为 30.5%，其次是 E 类，频率为 23.4%，不稳定类天气出现频率相对较小，其中强不稳定类 (A 类) 仅为 1.4%。

因此，银川市大气垂直结构不利于空气污染物湍流扩散。

### 2. 稳定度年变化特征

如表 3.3，秋末至隆冬 (11~1 月) 各月由于日出较晚，太阳高度角小，太阳辐射较弱，地表热收入小，热力湍流弱，大气层结较稳定，因此强稳定度 (F)

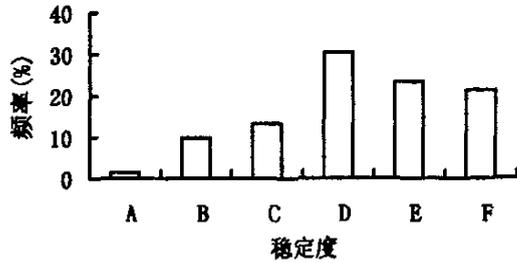


图 3.9 银川市各类稳定度频率 (%)

的频率远远大于其它月份，尤其 12 月 F 类出现频率高达 47%，此期间，不稳定类天气出现频率最小，统计时段内强稳定度 (A 类) 天气未出现。春季 (3~5 月)，由于风速较大，中性稳定度 (D) 天气占主导地位，频率为 38~40%，而此时由于气温逐渐回暖，热力湍流逐渐加强，不稳定类天气有所增加，B 类天气为 11~13%，强稳定度类天气明显减少，仅为 12~14%。而夏季各月 (6~8 月)，日出较早，日照时间长，太阳高度角大，辐射最强，地表热收入大，湍流发展，不稳定的频率最大，A、B、C 三类出现频率达 32~33%，而此期间稳定类天气出现频率最低，尤其 6 月强稳定度类 (F 类) 天气出现频率仅为 7%。秋季 9 月、10 月以 D、E、F 类天气为主，且三类天气出现几率相当，此期间多晴朗天气，尤其 9 月热力湍流仍较旺盛，因而不稳定类天气仍占一定比例，A、B 类天气出现频率与夏季各月相当。

表 3.3 银川各月稳定度频率 (%)

| 稳定度 | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 平均   |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|------|
| A   | 0  | 1  | 1  | 0  | 3  | 3  | 4  | 1  | 1  | 3   | 0   | 0   | 1.4  |
| B   | 2  | 9  | 11 | 13 | 11 | 11 | 11 | 15 | 14 | 13  | 3   | 4   | 9.8  |
| C   | 16 | 10 | 9  | 14 | 16 | 20 | 18 | 16 | 10 | 5   | 12  | 14  | 13.3 |
| D   | 19 | 28 | 38 | 38 | 40 | 43 | 37 | 30 | 26 | 25  | 27  | 15  | 30.5 |
| E   | 30 | 29 | 29 | 20 | 18 | 16 | 18 | 19 | 26 | 28  | 27  | 21  | 23.4 |
| F   | 33 | 23 | 13 | 14 | 12 | 7  | 11 | 18 | 22 | 25  | 30  | 47  | 21.3 |

### 3. 稳定度的日变化

由表 3.4 可见，银川市 02 时出现频率最高的是 E、F 类，频率达 81.8%，这是因为夜间地表长波辐射冷却，气温垂直递减率小，故层结稳定，不稳定类未出现。冬季 08 时日出较晚，地表受热较小，层结较稳定；4 月以后，气温升高，日出较早，日射渐渐增强，湍流也

有所发展, 不稳定层结持续时间较长, 08 时层结向不稳定转化。因而, 从平均状况分析, 08 时以中性类为主, 出现频率 47.8%, 其次是 E 类, 频率为 20.1%, A 类未出现; 午后, 地表受热达到极大, 14 时大气最为不稳定, 热力湍流最旺盛, 层结的温度递减率最大, 以 B、C 类为主, 频率为 71.2%, 而稳定类 (E、F) 未出现; 14 时以后, 日射逐渐减弱, 湍流活动也逐渐变弱, 20 时大气渐渐趋于稳定, 仅出现 D、E、F 类稳定度。

表 3.4 银川市各时次稳定度频率 (%)

| 时次 | A   | B    | C    | D    | E    | F    |
|----|-----|------|------|------|------|------|
| 02 | 0   | 0    | 0    | 18.3 | 39.1 | 42.7 |
| 06 | 0   | 6    | 16.1 | 47.8 | 20.1 | 10   |
| 14 | 5.5 | 33.6 | 37.6 | 23.4 | 0    | 0    |
| 20 | 0   | 0    | 0    | 32.6 | 35   | 32.6 |

### 3.4.3 银川市混合层厚度特征分析

大气混合层厚度是反映污染物在铅直方向扩散的重要参数, 也是影响大气污染物扩散的主要气象因子之一, 它表征了污染物在垂直方向被热力湍流稀释的范围, 即低层空气热力对流与动力湍流所能达到的高度, 与大气的稳定程度有密切关系。在不同的气象条件下, 同一个大气污染源排放的污染物在大气中的扩散能力是不同的, 大气混合层厚度越大, 就越有利于污染物的扩散和稀释。

#### 1. 日最大混合层厚度年变化

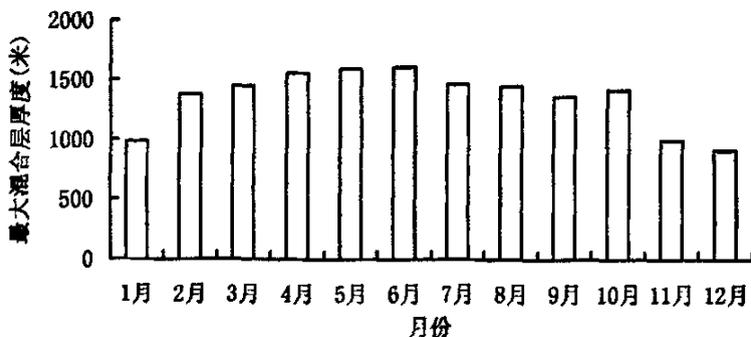


图 3.10 最大混合层厚度(米)年变化

由统计年份内最大混合层厚度年变化图中可明显看出 (见图 3.10), 银川市日最大混合层厚度冬季 12 月最小, 为 912.9 米, 其次是 1 月份, 为 988.0 米。这是因为银川市地处黄土高原, 冬季多由蒙古高压控制, 天气寒冷, 热力湍流弱, 混合层厚度最小; 随着气温的逐渐回暖, 热力湍流逐渐增强, 春季热力湍流已达相当强度, 混合层厚度达相对高值, 6 月份, 热力湍流达鼎盛, 因而混合层厚度达最大, 为 1608.2 米。而 7 月、8 月份, 银川地区正好是

降水多发时段，雨天其热力湍流作用减弱，动力湍流作用也较4、5、6月为弱，混合层厚度较4、5、6月稍低，平均为1557.56米；秋季9、10月份风和日丽，热力湍流作用虽较强，但其动力湍流作用减弱，混合层厚度较春夏各月低。从图中可见，10月份日最大混合层厚度略高于9月份，主要原因是10月份晴天日数较9月份要多，同时风速较9月份要大。

## 2. 混合层厚度日变化

银川市混合层厚度有明显日变化特征，即午夜(02时)最小，年平均混合层厚度为292.7米，次小值是20时，年平均混合层厚度为364.4米，午后(14时)达最大，为1348.5米，08时次之，为541.1米(表3.5)。分析不同月份情况，其变化特征基本相似。这是因为无论哪个月份，午夜及傍晚，风速较小，层结较稳定，另一方面，气温相对较低，因此热力湍流也相对较弱。午后一般风速相对较大，层结不稳定，日最高气温多出现在此时，因此热力湍流达到最旺盛。故午夜及傍晚污染物铅直稀释范围小，午后污染物铅直稀释范围达最大。这是银川市早晨及傍晚易出现高污染的原因之一。

表 3.5 银川市平均混合层厚度

| 时次  | 02时   | 08时   | 14时    | 20时   |
|-----|-------|-------|--------|-------|
| 01月 | 232.3 | 281.0 | 988.0  | 266.3 |
| 02月 | 271.7 | 385.5 | 1378.0 | 306.7 |
| 03月 | 364.0 | 495.3 | 1447.4 | 403.2 |
| 04月 | 350.5 | 814.4 | 1558.8 | 490.9 |
| 05月 | 360.8 | 893.6 | 1595.3 | 573.6 |
| 06月 | 356.3 | 805.6 | 1608.2 | 529.7 |
| 07月 | 294.4 | 676.8 | 1464.1 | 429.1 |
| 08月 | 303.4 | 723.5 | 1451.2 | 298.2 |
| 09月 | 236.4 | 459.4 | 1363.7 | 262.4 |
| 10月 | 241.3 | 393.9 | 1416.3 | 248.3 |
| 11月 | 269.6 | 376.8 | 998.3  | 328.3 |
| 12月 | 232.2 | 187.8 | 912.9  | 236.0 |
| 年平均 | 292.7 | 541.1 | 1348.5 | 364.4 |

## 3.5 本章小结

1. 银川市日照充足，光能资源丰富；干旱少雨，蒸发强烈；冬寒少奇冷，夏热少酷暑；春季多风沙，夏秋雨集中；昼夜温差大，无霜期较短属中温带大陆性半荒漠气候区。

2. 银川市一年中多出现 2.0~2.9m/s、3.0~4.9m/s 级风,  $\geq 5\text{m/s}$  的风出现频率较小。春夏季(3~8月)以 3.0~4.9m/s 级风为主, 秋冬季以 2.0~2.9m/s 级风为主。小风易出现在秋、冬季节, 而春季则易出现大风速段。一天中早晨及傍晚小风频率较高, 而大风速段多出现在 14 时。

3. 银川市一年中偏北风占主导地位, 偏西风出现频率最小。夏季以南风为主导风向, 秋末到来年春季则盛行偏北风。一天中大部分时次偏北、偏南风出现频率高, 而偏东、偏西风出现频率较低。

4. 银川市秋冬季节静风频率较高, 春季静风频率最低。一天中静风多出现在早晨, 午后出现几率最小。

5. 银川市一年中多出现中性类及稳定类天气, 不稳定类天气易出现在夏季, 而秋冬季节易出现稳定类天气。早晨及傍晚大气较稳定, 午后大气处于不稳定状态。

6. 银川市日最大混合层厚度夏季最大, 冬季最小, 一天中午夜(02时)混合层厚度最小, 午后(14时)混合层厚度最大。

## 第四章 银川市大气污染源的初步分析

### 4.1 主要统计指标解释

#### 1. 工业废气排放总量

指企业燃料燃烧和生产工艺过程中产生的各种排入空气的含有污染物的气体排放总量，以标准状态（273K，101325Pa）计。

工业废气排放总量 = 燃料燃烧过程废气排放量 + 生产工艺过程废气排放量

#### 2. 燃料燃烧废气排放量

指燃煤、油、气锅炉、铸造加热炉、退火炉及其他工业炉窑在燃烧过程中所排废气的总量（即燃料和物料不混合的燃料纯加热过程所产生的废气量）

#### 3. 生产工艺废气排放量

指生产工艺过程中排放的废气总量。如化工、冶炼、建材、化纤、造纸等行业生产工艺过程中排放的废气。

#### 4. 工业二氧化硫排放量

企业在燃料燃烧和生产工艺过程中排入大气的二氧化硫量。

#### 5. 工业二氧化硫去除量

指燃料燃烧和生产工艺废气经过各种废气治理设施处理后，去除的二氧化硫量。

#### 6. 工业烟尘排放量

指企业厂区内的燃料燃烧产生的烟气中夹带的颗粒物的量。

#### 7. 工业烟尘去除量

指企业燃料燃烧过程中产生的废气，经过各种废气治理设施处理后去除的烟尘量。

#### 8. 工业粉尘排放量

指企业在生产工艺过程中排放的颗粒物重量。如钢铁企业的耐火材料粉尘、焦化企业的筛焦系统粉尘、烧结机的粉尘、石灰窑的粉尘、建材企业的水泥粉尘等。不包括电厂排入大气的烟尘。可以通过排尘系统的排风量和除尘设备出口排尘浓度相乘求得，计算公式为：

工业粉尘排放量 = 排尘系统排风量 × 除尘设备出口气体含尘平均浓度 × 除尘系统运行时间

除尘系统出口的含尘浓度，均以所测的数字为准，无论测出的浓度是否符合排放标准，均应统计在内。

#### 9. 工业粉尘去除量

指企业在生产工艺过程中产生的废气，经过各种废气治理设施处理后，去除的粉尘重量（不包括电厂去除的烟尘）

#### 10. 燃料煤消费量

指企业用作燃料的煤炭（非标准煤）消费量，包括企业厂区内生产、生活用燃料煤，也包括砖瓦、石灰等产品生产用的燃料煤，不包括炼焦等行业的原料用煤。

#### 11. 原料煤消费量

指企业在生产工艺中用作原料并能转换成新的产品实体的煤炭消费量。如转换为焦炭、水泥、煤气、碳素、活性炭、氨氮等的煤炭称为原料煤。

#### 12. 工业锅炉数

指企业用于生产和生活的大于 1 蒸吨（含 1 蒸吨）的蒸汽锅炉、热水锅炉总数，不包括茶炉。

#### 13. 工业炉窑数

指企业生产用的炉窑总数，如炼铁高炉、炼钢炉、冲天炉、烘干炉窑、铸造加工热炉、水泥窑、石灰窑等。

#### 14. 生活及其他污染

指除工业生产活动以外的所有社会、经济活动辅助设计公共设施的经营产生的污染。

## 4.2 银川市大气污染源概况

由于污染源的分布和现状，是空气污染预报研究的基础，特别是燃烧设备、除尘脱硫设施、烟气排放高度、烟气排放速率、能源结构及煤炭质量等因素，直接影响着空气污染预报模式的精度，也就是说城市的空气污染与大气污染源关系密切，城市的大气质量和主要污染物的浓度取决于污染源排放源强。因此，通过调查分析大气污染源的数量、分布、耗能量和排污量，可为城市空气污染预报打下可靠的基础。

银川市环境监测中心站于 1999 年针对全市工业锅炉、茶浴炉及居民炉灶开展了一次污染源普查工作。由于银川市的能源主要以煤炭为主，因此燃煤消耗量最大，由这些污染源每年向大气中排放的工业废气大约为 1 904 405 万标立方米，其中年均排放  $\text{SO}_2$  为 3.17 万吨，烟尘 1.35 万吨。当时全市共有锅、茶炉 1 743 台，年耗煤量 217.13 万吨，其中工业煤炭消耗总量 139.0 万吨，占总耗煤量的 64%，且主要以燃煤为主，燃煤 3.25 万吨，占工业用煤的 67%，原料用煤 45.75 万吨，全市年生活煤消耗量 78.13 万吨，占总耗煤量的 36%，释放二氧化硫 33 459.36 吨，其中工业废气中排放二氧化硫 20 254.36 吨，占 61%，生活及其它排放二氧化硫 13 205 吨。年烟尘排放量 15 145.47 吨，其中 87% 的烟尘来自工业废气，生活及其它排放烟尘 1 899 吨。污染源主要集中在兴庆区及金凤区，兴庆区排放源最多，为 975 台，占全市总数的 56%，其中源高小于 20 米的数量较多，为 609 台，占兴庆区排放源的 62%，

源高大于 20 米的有 366 台。金凤区共有锅茶炉 768 台，也以小于 20 米的源数量最多，占金凤区总数的 66%，源高在 21~50 米之间的有 251 台，占金凤区排放源的 33%，源高大于 50 米的仅占金凤区排放源的 1%。从全市情况分析，99% 的污染源源高小于 50 米，其中源高小于 20 米的占 64%，源高在 21~50 米之间的占 35%，而源高在 51~70 米之间的全市共有 9 台，源高大于 70 米的仅有 3 台。全市排放源特点为一次污染物源排放最多，且排放源多为矮架源，高架源相对较少。

自 2000 年以来，银川市环保局将建在居民集中区、群众投诉不断、严重影响周围环境的燃煤小锅炉一一拆除，为了让市民在冬日也能感受到大自然的魅力，银川市正式启动“凤城蓝天工程”，针对城乡接合部等重点区域烟尘污染严重、群众投诉较多的情况，银川市专门出台了《银川市禁止使用燃料型高污染煤管理办法》。市环境监察支队对全市所有供热单位、锅炉使用单位广泛宣传，严格要求单位和居民用煤必须用低污染煤。并与全市 300 多家供热单位签订了用低硫份、低灰份、低污染煤的承诺书。进入冬季采暖期后，银川市环境监察支队对银川市三区范围内的锅炉、窑炉、大灶排放的烟尘、二氧化硫、噪声以及污染治理设施运行状况、环保审批手续、排污许可证办理及茶浴炉燃料煤等进行现场环境监察和“拉网”式检查。对违反相关规定的单位或个人，依照《银川市禁止使用燃料型高污染煤管理办法》的规定，从重给予处罚。截至目前，银川市共拆除燃煤小锅炉 550 台，直接将居民采暖接入燃煤集中供热。目前全市集中供热率已达到 74%，因拆除燃煤小锅炉，银川市空气质量大为改观。据统计，全市共增加集中供热面积 60 万平方米，减少燃煤近 2.8 万吨，每年减排二氧化硫 366 吨，减排烟尘 842 吨，说明市政府开展的环境综合治理产生了一定的效力。为了进一步地改善环境，银川市环保局要求各燃煤供热锅炉房除了严格使用无烟煤外，有条件的必须建设封闭煤场，没有条件的必须采取相应的扬尘防治措施，并要求各单位及时查找自身不足，提交整改计划。

“蓝天工程”的实施大大改观了银川市空气质量，但新的污染问题仍不容忽视。据银川市环境监测中心站统计，银川市目前拥有各类企业 500 余个，其中尤以石油化工、建材、造纸、医药、机械加工等 48 个企业排污严重，而且城市建筑、交通运输、餐饮娱乐业扬尘与废气的排放已逐渐成为银川市新的污染源。

### 4.3 银川市工业废气中主要污染物排放情况

说明：因受调查资料的限制，本文在大气污染源分析研究中仅以 2004 年银川市部分污染源特征及工业废气中主要大气污染物排放情况为例。

#### 4.3.1 工业污染源分布情况

2004 年银川市工业锅炉数为 129 台，约占宁夏工业锅炉总数的 18.0%，其中烟尘排放

达标的为 128 台，达标率约为 99.2%，二氧化硫排放达标的为 117 台，达标率约为 90.7%；工业锅炉蒸吨数为 2471.5 蒸吨，其中烟尘排放达标的为 2467.5 蒸吨，约占银川市工业锅炉总蒸吨数的 99.8%，二氧化硫排放达标的为 2325.0 吨，约占总蒸吨数的 94.1%；工业炉窑数为 25 台，仅占全总数的 1.9%左右，其中烟尘和二氧化硫排放均达标（表 4.1）。

表 4.1 2004 年银川市及其所辖市县工业污染源统计简表

| 区域  | 工业         | 排放达标 |                 | 工业锅炉蒸吨数<br>(蒸吨) | 排放达标    |        | 工业              | 排放达标       |     |                 |
|-----|------------|------|-----------------|-----------------|---------|--------|-----------------|------------|-----|-----------------|
|     | 锅炉数<br>(台) | (台)  |                 |                 | (蒸数)    | (台)    |                 | 炉窑数<br>(台) | (台) |                 |
|     |            | 烟尘   | SO <sub>2</sub> |                 |         | 烟尘     | SO <sub>2</sub> |            | 烟尘  | SO <sub>2</sub> |
| 银川市 | 129        | 128  | 117             | 2471.5          | 2467.5  | 2325.0 | 25              | 25         | 25  |                 |
| 永宁县 | 28         | 23   | 23              | 207.5           | 155.5   | 181.5  | 4               | 4          | 4   |                 |
| 贺兰县 | 10         | 7    | 6               | 78.0            | 59.0    | 54.0   | 8               | 0          | 0   |                 |
| 灵武市 | 53         | 51   | 53              | 178.5           | 173.5   | 178.5  | 32              | 30         | 26  |                 |
| 全区  | 717        | 649  | 541             | 12279.0         | 11861.5 | 9226.0 | 1286            | 926        | 861 |                 |

#### 4.3.2 工业能消耗情况

表 4.2 2004 年银川市及其所辖市县工业能消耗统计表

| 区域名称 | 煤炭消费<br>总量<br>(吨) | 其中：(吨)     |            | 燃料油消费量<br>(不含车船用)<br>(吨) | 其中：(吨) |      | 天然气消费<br>量<br>(万立方米) |
|------|-------------------|------------|------------|--------------------------|--------|------|----------------------|
|      |                   | 燃料煤<br>消费量 | 原料煤<br>消费量 |                          | 重油     | 柴油   |                      |
|      |                   |            |            |                          |        |      |                      |
| 银川市  | 1861344           | 1474038    | 387306     | 4866                     | 4376   | 490  | 58014                |
| 永宁县  | 154211            | 88835      | 65376      | 0                        | 0      | 0    | 36                   |
| 贺兰县  | 130189            | 51793      | 78396      | 0                        | 0      | 0    | 207                  |
| 灵武市  | 89250             | 65698      | 23552      | 1540                     | 1540   | 0    | 210                  |
| 宁夏全区 | 19667516          | 15744261   | 3923255    | 17500                    | 9197   | 8303 | 58597                |

表 4.2 为 2004 年银川市及所辖一市二县能消耗统计表。由此可见，2004 年银川市环境统计的煤炭消费总量为 1 861 344 吨，约占全区煤炭消费总量的 9.5%，其中燃料煤消费量为 1 474 038 吨，约占全区燃料煤消费总量的 9.4%，原料煤消费量为 387 306 吨，约占全区原料煤消费总量的 9.9%；燃料油消费量（不含车船用）为 4 866 吨，约占全区燃料油消费总量的 27.8%，其中重油消费量为 4 376 吨，约占全区重油消费量的 47.6%，柴油消费量为 490 吨，约占全区柴油消费总量的 5.9%；天然气消费量为 58 014 万立方米，占全区天然气消费总量的 99.0%。

### 4.3.3 工业废气排放情况

2004年银川市工业废气排放总量为2902223万标立方米，约占全区工业废气排放总量的12.4%，其中燃料燃烧过程中废气排放量为1185202万标立方米，生产工艺过程中废气排放量为1717021万标立方米；2004年银川市废气治理设施共有137套，约占全区废气治理总数的10.7%，其中用于脱硫设施为56套；废气治理设施处理能力为7907147标立方米/时，其中脱硫设施脱硫能力为24048千克/时（表4.3）。

表4.3 2004年银川市及其所辖市县工业废气排放及治理情况统计表

| 区域名称 | 工业废气排放总量<br>(万标立方米) | 其中：(万标立方米) |            | 废气治理设施数<br>(套) | 其中：脱硫设施数<br>(套) | 废气治理设施处理能力<br>(标立方米/时) | 其中：脱硫设施<br>脱硫能力<br>(千克/时) |
|------|---------------------|------------|------------|----------------|-----------------|------------------------|---------------------------|
|      |                     | 燃料燃烧过程中排放量 | 生产工艺过程中排放量 |                |                 |                        |                           |
| 银川市  | 2902223             | 1185202    | 1717021    | 137            | 56              | 7907147                | 24048                     |
| 永宁县  | 326073              | 83897      | 242176     | 27             | 10              | 219900                 | 9684                      |
| 贺兰县  | 48055               | 47475      | 580        | 15             | 10              | 54224                  | 35                        |
| 灵武市  | 64657               | 42797      | 21860      | 42             | 3               | 330380                 | 100                       |
| 宁夏全区 | 23376122            | 12733283   | 10642839   | 1278           | 369             | 35169829               | 177426                    |

### 4.3.4 工业废气中二氧化硫排放情况

表4.4 2004年银川市及其所辖市县工业二氧化硫排放情况统计表（单位：千克）

| 区域名称 | 二氧化硫排放量   | 其中：燃料燃烧过程中的排放量 |           | 其中：生产工艺过程中的排放量 |         |
|------|-----------|----------------|-----------|----------------|---------|
|      |           | 排放量            | 达标量       | 排放量            | 达标量     |
| 银川市  | 11419462  | 11118470       | 11106470  | 300992         | 299736  |
| 永宁县  | 1171245   | 926695         | 690762    | 244550         | 199395  |
| 贺兰县  | 1007844   | 1007044        | 837680    | 800            | 0       |
| 灵武市  | 1145533   | 1019422        | 621822    | 126111         | 126111  |
| 宁夏全区 | 218128247 | 206497641      | 172824626 | 11630606       | 7660184 |

2004年银川市工业废气中二氧化硫排放量为11419462千克，约占全区总排放量的5.2%，其中燃料燃烧过程中二氧化硫的排放量为11118470千克，达标量为1106470千克，达标率超过了99%；生产工艺过程中二氧化硫的排放量为300992千克，达标量为299736

千克，达标率也超过了 99%（表 4.4）。2004 年银川市投入废气治理设施运行费用约为 1800 万元，约占全区总投入费用的 12.7%，二氧化硫的去除量为 11 553 378 千克，约占全区当年二氧化硫去除量的 28.8%。

据银川市环境监测中心统计，近年来银川市已初步控制了生活污染源中二氧化硫排放量的增长，使生活二氧化硫排放量基本保持平稳趋势，在 2004 年出现排放量的缓慢下降；全市工业二氧化硫排放量在 1997 年以前，总体呈上升趋势，1997~2001 年呈直线下降态势，2002~2004 年工业二氧化硫排放量有增有减，总体趋势仍在下降，与 2003 年相比，2004 年银川市二氧化硫减幅为 12.4%。

#### 4.3.5 工业烟尘及粉尘排放情况

2004 年银川市工业烟尘去除量为 49 810 672 千克，约占全区工业烟尘总去除量的 1.5%，烟尘排放量为 3 114 152 千克，约占全区总排放量的 3.9%，排放达标率达 99.6%；工业粉尘去除量为 77 695 544 千克，约占全区总去除量的 22.9%，工业粉尘排放量为 4 008 838 千克，约占全区总排放量的 4.6%，排放达标率为 100%（表 4.5）。

表 4.5 2004 年银川市及其所辖市县工业烟尘及粉尘排放情况统计表

| 区域名称 | 烟尘（千克）     |          |          | 工业粉尘（千克）  |          |          |
|------|------------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|      | 去除量        | 排放量      | 排放达标量    | 去除量       | 排放量      | 达标量      |
| 银川市  | 49810672   | 3114152  | 3102900  | 77695544  | 4008838  | 4008838  |
| 永宁县  | 2182006    | 952796   | 899936   | 30000     | 137470   | 132470   |
| 贺兰县  | 815600     | 392862   | 252300   | 33000     | 51732    | 51392    |
| 灵武市  | 2328376    | 355837   | 329904   | 3427516   | 193689   | 193689   |
| 宁夏全区 | 3230638965 | 79173691 | 64478525 | 339694758 | 87911135 | 47857627 |

据统计，2004 年银川市工业烟尘和工业粉尘与 2003 年相比的减幅均高于二氧化硫，说明在相同的工业生产形势下，工业烟尘和工业粉尘的去除水平高于工业二氧化硫。

### 4.4 银川地区大气主要污染物排放量与宁夏各地市的比较

宁夏辖银川、石嘴山、吴忠、中卫和固原 5 市，本节以 2004 年宁夏各地市大气主要污染物排放量数据为例，简要说明银川市大气主要污染物的排放量在全区所占的名次。

注：文中各地市排放量含其所辖市县的排放总量；污染物的排放总量为工业及生活排放量之和。

#### 4.4.1 二氧化硫排放情况

2004 年宁夏各市中吴忠市二氧化硫排放总量 10.18 万吨，为全区之首；其次为石嘴山市

二氧化硫排放总量 8.72 万吨；中卫市排放 3.38 万吨，居第三位；银川市排放 2.12 万吨，居第四位；固原市排放 0.7 万吨，居第五位。工业二氧化硫排放量最多的是吴忠市 0.52 万吨，占全区工业二氧化硫排放量的 43.6%。生活二氧化硫排放量最多的是中卫市 1.05 万吨，占全区生活二氧化硫排放量的 31.9%。

#### 4.4.2 烟尘排放情况

2004 年全区烟尘排放总量为 9.51 万吨，其中石嘴山市以 4.35 万吨排放量居首位，其余依次为吴忠市 1.96 万吨、中卫市 1.95 万吨、银川市、固原市均为 0.62 万吨。工业烟尘排放量最多的是石嘴山市 4.19 万吨，占全区工业烟尘排放量的 52.9%。生活烟尘排放量最多的是吴忠市 0.59 万吨，占全区生活烟尘排放量的 37.1%。

#### 4.4.3 粉尘排放情况

2004 年全区工业粉尘排放量 8.79 万吨，石嘴山市排放 4.12 万吨，位居第一，占全区工业粉尘排放量的 46.9%。其余依次为中卫市排放 2.17 万吨、吴忠市排放 1.57 万吨、固原市 0.49 万吨，银川市 0.44 万吨。

### 4.5 主要工业行业废气排放情况

按行业分析废气排放数据，结果显示工业废气及其主要污染物排放具有非常明显的行业分布特征。电力和热力的生产和供应业的工业废气、二氧化硫、烟尘排放量占工业排放量的比例分别为 37.3%、78.4%和 49.3%，均居全市各行业首位；黑色金属冶炼及压延加工业、非金属矿物制品业、化学原料及化学制品制造业排放的粉尘量占全区工业粉尘排放量的 47.6%、26.7%、14.5%。

2004 年二氧化硫排放量排名前六位的行业是电力业、化工制造业、非金属矿物制品业、造纸及纸制品业、有色金属冶炼及压延加工业、黑色金属冶炼及压延加工业，六行业共排放二氧化硫 19.54 万吨，占到重点统计企业二氧化硫排放量的 96.3%。电力、热力的生产和供应业、造纸及纸制品业、黑色金属冶炼及压延加工业的污染贡献率有所下降，其它行业均呈现逐步走高的发展趋势。其中化工、冶金行业的污染贡献率明显随经济贡献率的增长而提高，但排放强度有所下降，表明这些行业在发展加快的同时注重环境污染防治，经济效益与环境效益同步增长。

## 第五章 银川市大气污染物浓度分布特征及其变化规律

### 5.1 大气环境质量标准

环境空气质量标准最初是 1982 年制定的，经 1996 年修订和 2000 年发布的《环境空气质量标准》的修改单后，形成现在的 9 项污染物的空气质量标准。

#### 5.1.1 环境空气质量功能区的分类

环境空气质量功能区分三类。一类区为自然保护区、风景名胜区和需要特殊保护的地区；二类区为城镇规划中确定的居住区、商业交通居民混合区、文化区、一般工业区和农村地区；三类区为特定工业区。

功能区的划分是根据不同功能对环境质量的不同要求，实现对不同保护对象进行分区保护而制定的。一类区以保护自然生态及公众福利为主要对象，二类及三类区以保护人体健康为主要对象。标准中制定的三类区是从当时国民经济技术能力考虑，有些污染严重的工业区，大气自净能力又较低的地区，短期内进行污染治理有一定的困难，允许这部分地区采用三类区的空气质量标准，但其标准限值也是接近或在环境基准阈值之内。随着国民经济技术能力的提高，目前各城市的环境空气功能区划已经很少有三类区了。

#### 5.1.2 环境空气质量标准分级

表 5.1 环境空气质量标准限值 (GB 3095-1996)

| 污染物名称                      | 取值时间   | 浓度限值 |      |      | 浓度单位                        |
|----------------------------|--------|------|------|------|-----------------------------|
|                            |        | 一级标准 | 二级标准 | 三级标准 |                             |
| 二氧化硫 (SO <sub>2</sub> )    | 年平均    | 0.02 | 0.06 | 0.10 | mg/m <sup>3</sup><br>(标准状态) |
|                            | 日平均    | 0.05 | 0.15 | 0.25 |                             |
|                            | 1 小时平均 | 0.15 | 0.50 | 0.70 |                             |
| 可吸入颗粒物 (PM <sub>10</sub> ) | 年平均    | 0.04 | 0.10 | 0.15 |                             |
|                            | 日平均    | 0.05 | 0.15 | 0.25 |                             |
| 二氧化氮 (NO <sub>2</sub> )    | 年平均    | 0.04 | 0.08 |      |                             |
|                            | 日平均    | 0.08 | 0.12 |      |                             |
|                            | 1 小时平均 | 0.12 | 0.24 |      |                             |

标准分级是对应于不同环境空气质量功能区，为不同保护对象而建立的评价和管理环境空气质量的定量目标。环境空气质量的标准共分为三级，一类区执行一级标准，二类区执行二级标准，三类区执行三级标准。

#### 5.1.3 常规污染物的浓度限值

国家环保总局在 2000 年颁布的“关于发布《环境空气质量标准》(GB 3095—1996) 修

改单的通知”，考虑到与国外大部分国家制定的环境空气质量标准一致性，取消了氮氧化物（NO<sub>x</sub>）指标；二氧化氮（NO<sub>2</sub>）的二级标准的年平均浓度限值由 0.04mg/m<sup>3</sup> 改为 0.08mg/m<sup>3</sup>，日平均浓度限值由 0.08mg/m<sup>3</sup> 改为 0.12mg/m<sup>3</sup>，小时平均浓度限值由 0.12mg/m<sup>3</sup> 改为 0.24mg/m<sup>3</sup>，详见表 5.1。

### 5.1.4 数据统计的有效性规定

污染物监测数据是按取值时间内的有效数据进行统计的<sup>[66]</sup>。年平均是指任何一年的日平均浓度的算术均值，每年至少有分布均匀的 144 个日均值，每月至少有分布均匀的 12 个日均值；季平均是指任何一季的日平均浓度的算术均值，每季至少有分布均匀的 15 个日均值，每月至少有分布均匀的 5 个日均值；月平均是指任何一日的平均浓度，每月至少采样 15 日以上；日平均是指任何一日的平均浓度，每日至少有 12 或 18 小时的采样时间；1 小时平均是指任何一小时的平均浓度，每小时至少有 45 分钟的采样时间；植物生长季平均是指任何一个植物生长季月平均浓度的算术均值。详见表 5.2。

表 5.2 常规污染物数据统计的有效性规定

| 污染物  | 取值时间   | 数据统计的有效性          |
|--|--------|-------------------|
| SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , CO                 | 日平均    | 每日至少有 18 小时的采样时间  |
| TSP, PM <sub>10</sub>                                  | 日平均    | 每日至少有 12 小时的采样时间  |
| SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , CO, O <sub>3</sub> | 1 小时平均 | 每小时至少有 45 分钟的采样时间 |

## 5.2 银川市空气主要污染物监测项目

空气中主要污染物是尘、硫氧化物、氮氧化物和一氧化碳等，目前银川市设有三个大气污染自动监测站，分别位于兴庆区的师范学校、金凤区的郊区水产研究所和西夏区的长城铸造厂（图 5.1）。

各监测点均采用大西比——东宇环境监测仪器有限公司的大西比 1000 自动空气环境质量监测系统，对空气主要污染物可吸入颗粒物（PM<sub>10</sub>）、二氧化硫（SO<sub>2</sub>）、二氧化氮（NO<sub>2</sub>）进行实时的浓度监测。其中师范学校监测点（106° 16′ E, 38° 28′ N）自

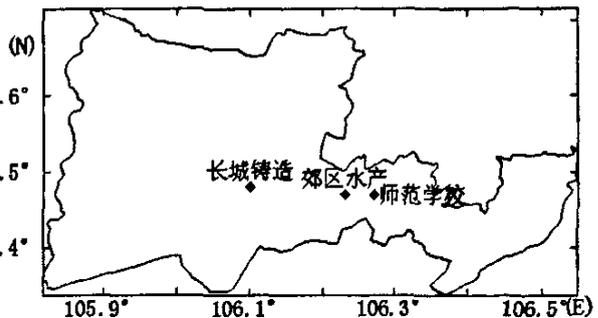


图 5.1 银川市大气污染观测点的位置

2000 年 6 月 1 日开始正式观测，郊区水产研究所（106° 14′ E, 38° 28′ N）和西夏区的长城铸造厂（106° 06′ E, 38° 29′ N）两个自动观测点建站较晚，均从 2004 年 5 月 25 日开始

才有了正式观测记录，故在本文中，若没有特殊说明，均以银川市兴庆区的师范学校监测资料来进行分析研究。

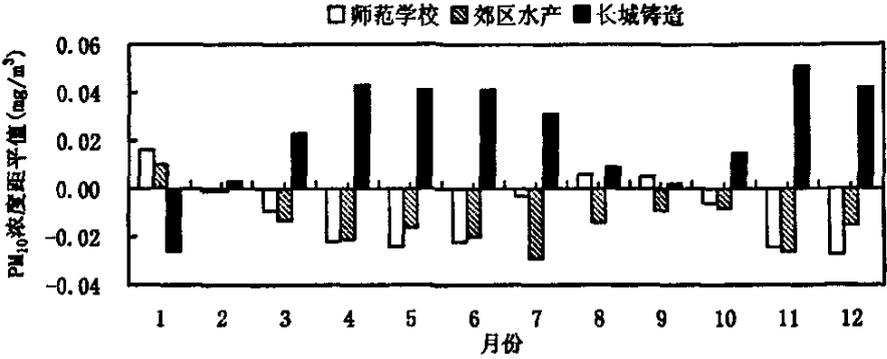


图 5.2 2005 年 1~12 月银川市各监测站 PM<sub>10</sub> 浓度距平值

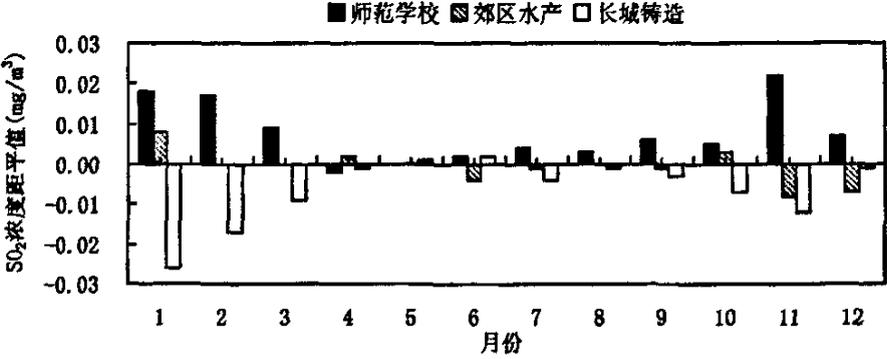


图 5.3 2005 年 1~12 月银川市各监测站 SO<sub>2</sub> 浓度距平值

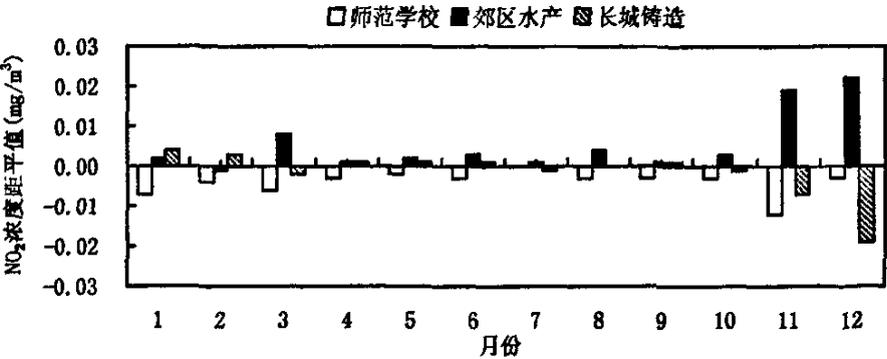


图 5.4 2005 年 1~12 月银川市各监测站 NO<sub>2</sub> 浓度距平值

定义银川市污染物平均浓度值为三个监测点观测值的算术平均值，即：

$$\bar{\rho}_i = \frac{1}{3} \left( \sum_{j=1}^3 \rho_{ij} \right)$$

其中  $\bar{\rho}_i$  为银川市第  $i$  种污染物平均浓度值 ( $i=1,2,3$ ),  $\rho_{ij}$  为第  $i$  种污染物在第  $j$  监测点的监测值。

定义某监测点的某种污染物浓度值与银川市该种污染物平均浓度值的差为该监测点的该污染物的距平值, 公式为:

$$C_{ij} = \rho_{ij} - \bar{\rho}_i$$

其中  $C_{ij}$  为第  $i$  种污染物在第  $j$  监测点的距平值。

表 5.3 2005 年银川市各监测站主要污染物年平均统计值(mg/m<sup>3</sup>)

| 项目               | 师范学校  | 郊区水产  | 长城铸造  | 银川平均  |
|------------------|-------|-------|-------|-------|
| PM <sub>10</sub> | 0.084 | 0.080 | 0.116 | 0.093 |
| SO <sub>2</sub>  | 0.056 | 0.048 | 0.042 | 0.049 |
| NO <sub>2</sub>  | 0.024 | 0.034 | 0.027 | 0.028 |

表 5.3 为 2005 年银川市各监测站及全市平均各主要污染物年平均统计值(mg/m<sup>3</sup>), 图 5.2 ~ 5.4 为各监测点 2005 年 1~12 月 PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 浓度距平值。由此可知, 各监测点中长城铸造 PM<sub>10</sub> 浓度值最大、师范学校 SO<sub>2</sub> 浓度值最大、郊区水产 NO<sub>2</sub> 浓度值相对较大。

### 5.3 大气现状及其污染趋势分析

#### 5.3.1 空气污染现状

表 5.4 银川城区主要污染物年平均浓度值统计表 (mg/m<sup>3</sup>)

| 年度   | PM <sub>10</sub> |       |       | SO <sub>2</sub> |       |       | NO <sub>2</sub> |       |       |
|------|------------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|
|      | 采暖期              | 非采暖期  | 全年    | 采暖期             | 非采暖期  | 全年    | 采暖期             | 非采暖期  | 全年    |
| 2001 | 0.149            | 0.126 | 0.146 | 0.090           | 0.026 | 0.080 | 0.068           | 0.031 | 0.037 |
| 2002 | 0.125            | 0.087 | 0.113 | 0.145           | 0.024 | 0.058 | 0.053           | 0.027 | 0.045 |
| 2003 | 0.121            | 0.090 | 0.104 | 0.105           | 0.032 | 0.071 | 0.085           | 0.042 | 0.051 |
| 2004 | 0.106            | 0.087 | 0.100 | 0.093           | 0.022 | 0.056 | 0.035           | 0.037 | 0.051 |
| 2005 | 0.104            | 0.073 | 0.084 | 0.096           | 0.024 | 0.056 | 0.043           | 0.018 | 0.024 |
| 平均   | 0.121            | 0.093 | 0.109 | 0.106           | 0.026 | 0.064 | 0.057           | 0.031 | 0.042 |

目前, 银川市的大气污染比较严重, 既有因燃煤(油)产生的煤烟型污染, 也有石化工业排放的废气和各类机动车辆排放的尾气污染, 还有因沙尘暴和浮尘天气的影响及地面二次扬尘的污染。本文根据市环境监测中心站提供的 2001~2005 年近 5 年的兴庆区师范学校大

气自动监测数据,对银川市大气中主要污染物的年平均浓度值,分采暖期(当年11月~次年3月)和非采暖期(4~10月)两个不同的污染时段,进行了统计分析。

表 5.4 是银川市空气中主要污染物的年平均浓度统计表。

通过表 5.4 分析可知,银川市 2001~2005 年空气中  $PM_{10}$  的年均浓度值为  $0.109mg/m^3$ ,以国标二级标准为基准值,超标 0.09 倍。其中最大年平均浓度值是  $0.146mg/m^3$ ,出现在 2001 年,超标 0.46 倍;最小年平均浓度值是  $0.084mg/m^3$ ,出现在 2005 年,污染等级没有超过国标二级标准;最大日均值  $0.754mg/m^3$ ,出现在 2001 年 4 月 29 日,超标 4.03 倍;最小日均浓度值为  $0.01mg/m^3$ ,出现在 2005 年 7 月 16 日,低于国家的二级标准。

空气中  $SO_2$  的年均浓度值是  $0.064mg/m^3$ ,超标 0.07 倍。其中最大年平均浓度值是  $0.080mg/m^3$ ,出现在 2001 年,超标 0.33 倍;最小年平均浓度值是  $0.056mg/m^3$ ,出现在 2004 年和 2005 年,低于二级标准;最大日均浓度值为  $0.910mg/m^3$ ,出现在 2002 年 11 月 23 日,超标 5.07 倍;最小日均浓度值为  $0.003mg/m^3$ ,分别出现在 2004 年 5 月 16~17 日、2004 年 6 月 10 和 2005 年 4 月 11 日,均低于二级标准。

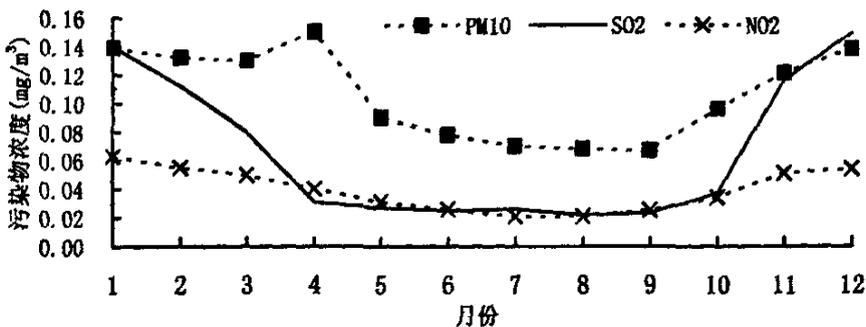


图 5.5 近 5 年银川市主要污染物年变化曲线

在统计时段内,银川市空气中  $NO_2$  的年均浓度值是  $0.042mg/m^3$ ,低于国家二级标准。其中最大年均浓度值为  $0.051mg/m^3$ ,出现在 2003 年和 2004 年,仍低于国家二级标准;最小年平均浓度值是  $0.024mg/m^3$ ,出现在 2005 年,低于国家的二级标准;最大日均浓度值为  $0.129mg/m^3$ ,出现在 2004 年 1 月 29 日,超标 0.08 倍;最小日均浓度值为  $0.002mg/m^3$ ,出现在 2004 年 5 月 1 日和 2005 年 8 月 9 日,低于国家二级标准。

从表 5.4 进一步分析可知,银川市空气首要污染物为  $PM_{10}$ 。

由主要污染物浓度逐月变化图可知(图 5.5),银川市  $PM_{10}$  浓度峰值集中在 3~4 月份,其主要原因是西北地区春季沙尘暴和浮尘的影响所致,其中最大月均浓度值为  $0.150mg/m^3$ ,出现在 4 月份,最小值为  $0.067mg/m^3$ ,出现在 9 月份; $SO_2$  月均浓度值的变化曲线呈槽型分布,并且月变化规律十分明显,冬季采暖期的  $SO_2$  月均浓度值都在  $0.08mg/m^3$  以上,而非采暖期的  $SO_2$  浓度值都在  $0.04mg/m^3$  以下,其中最大月均浓度值为  $0.149mg/m^3$ ,出现在 12

月份，最低月均浓度值为  $0.022\text{mg}/\text{m}^3$ ，出现在 8 月份； $\text{NO}_2$  的月均浓度值变化规律也比较明显，每年 11 月至次年 3 月， $\text{NO}_2$  的污染比较严重，其中月均浓度最大值为  $0.063\text{mg}/\text{m}^3$ ，出现在 1 月份，最小值为  $0.021\text{mg}/\text{m}^3$ ，出现在 7~8 月份。

### 5.3.2 主要污染物日变化

统计计算银川市自动监测站 24 小时逐时浓度数据，得到一张表征银川市主要污染物日变化平均谱图（见图 5.6）。从图 5.6 中可明显看出  $\text{PM}_{10}$  浓度依次大于  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$ ， $\text{PM}_{10}$  与  $\text{SO}_2$  污染浓度早晨高于傍晚， $\text{NO}_2$  正好相反，傍晚大于早晨，此三种污染物的日变化特征与北京地区近地面气溶胶浓度的周日变化特征基本一致<sup>[67]</sup>。其中  $\text{PM}_{10}$  浓度值在  $0.127\sim 0.172\text{mg}/\text{m}^3$  之间平缓摆动，第一峰值出现在早晨 08 时，次大值出现在 23 时，仅比极大值差  $0.005\text{mg}/\text{m}^3$ ，两个谷底出现在 04 时和 15 时，浓度仅相差  $0.001\text{mg}/\text{m}^3$ ； $\text{SO}_2$  浓度值维持在  $0.065\sim 0.144\text{mg}/\text{m}^3$  之间，第一峰值出现在 10 时，第二峰值出现在 07 时，浓度值为  $0.141\text{mg}/\text{m}^3$ ，第三峰值出现在 22 时，浓度值达  $0.126\text{mg}/\text{m}^3$ ，两个谷底出现在 03 时和 15 时，浓度相差  $0.002\text{mg}/\text{m}^3$ ； $\text{NO}_2$  浓度振幅较小在  $0.020\sim 0.044\text{mg}/\text{m}^3$  之间摆动，第一峰值出现在 21 时，第二峰值出现在 07 时，浓度为  $0.036\text{mg}/\text{m}^3$ ，两个低值同样出现在深夜的 03 时和中午的 14 时，浓度相差  $0.004\text{mg}/\text{m}^3$ 。

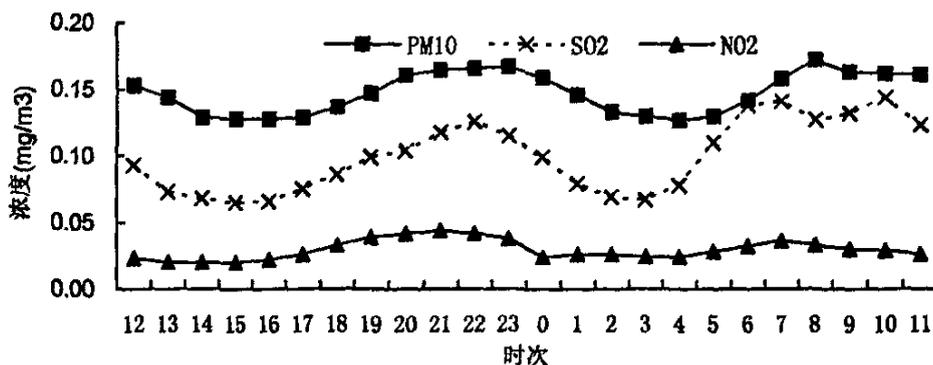


图 5.6 银川市主要污染物日变化平均谱图

综合分析  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  日变化特征形成的原因。早晨，一方面随着人为活动的增加，各种生活扬尘、饮食炉灶、锅炉燃煤、机动车燃油排放也随之剧增。另一方面，近地层贴地及低悬逆温的出现，导致空气污染物不易向上扩散，从而使这三种污染物浓度聚集为当日的极大值或次大值，这与北方城市一般都是 07~10 时污染最严重是一致的<sup>[68]</sup>；午后，由于近地面温度较高，湍流较强，空气对流充分，垂直输送加强，因此，地面浓度出现低值；傍晚前后，与早晨人为活动的情况相似，在各种尘增加的同时，随着近地面温度的降低，近地层面上层空气冷却较慢，时有辐射逆温产生，在对流较弱的情况下，形成污染浓度较高的状况；深夜，随着各种人为活动的锐减，空气中各种尘也随之减少，致使深夜时段浓度进入第二个

低值区。SO<sub>2</sub>在上午 10 时出现极大值及 NO<sub>2</sub> 深夜时段的相对凸现，均说明工业源燃煤、燃油定时排放的明显存在。早晨各污染物 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 PM<sub>10</sub> 峰值出现时间依次为 06 时、07 时和 08 时，恰好反映了银川市市民的生活规律，以冬至日出时间（8：10）为标准（因为冬季污染最严重），NO<sub>2</sub> 与 SO<sub>2</sub> 峰值比日出时间提前约 1~2 小时出现，PM<sub>10</sub> 峰值出现时间与日出时间基本一致，即采暖和生活燃煤排放 06 时达最大，紧接着 07 时机动车及居民燃油炉灶的排放达最高峰，随后，人为活动剧增，08 时各种扬尘排放量也相应达最高。

### 5.3.3 主要污染物季变化

#### 1. PM<sub>10</sub> 季变化

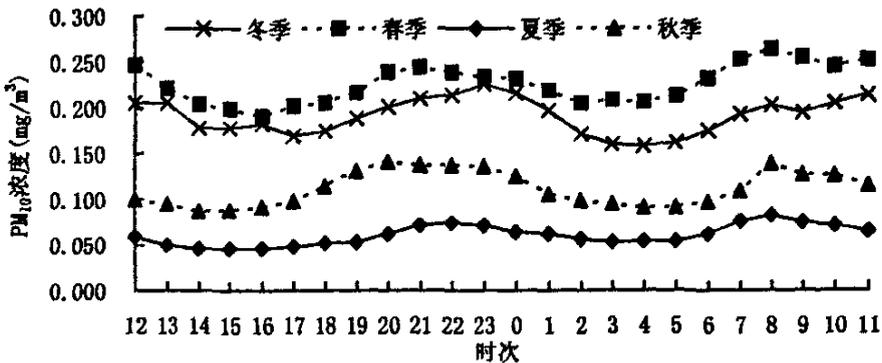


图 5.7 银川市 PM<sub>10</sub> 四季变化平均谱图

统计计算 PM<sub>10</sub> 四季逐时浓度得到 PM<sub>10</sub> 四季变化平均谱图（见图 5.7），曲线基本均呈双峰型，污染浓度春季最大、冬季次之、秋季较小、夏季最小。春季浓度维持在 0.191~0.264 mg/m<sup>3</sup> 之间，季平均浓度为 0.226 mg/m<sup>3</sup>，极大值出现在 08 时，相对次大值出现在 21 时，极小值出现在 16 时，次小值出现在 02 时。导致春季浓度最大的原因，是自然降尘，即由于大风引起浮尘、扬沙、沙尘暴的频繁出现，致使空气中可吸入颗粒物剧增。据银川市 30 年气象资料统计，春季出现大风、沙尘暴日数分别占全年出现日数的 42% 和 56%；冬季浓度在 0.158~0.226 mg/m<sup>3</sup> 之间摆动，季平均浓度为 0.191mg/m<sup>3</sup>，极大值出现在 23 时，相对次大值出现在 08 时，极小值出现在 04 时，相对次小值出现在 14 时。

冬季浓度较大的主要原因，是由于大多数中、小锅炉和无数生活炉灶无除尘设备，它们向大气中排放大量的烟灰和煤飞灰，据测定，一般煤粉炉，在无除尘设备的情况下，85%左右的灰分以飞灰形式随烟气离开锅炉，其中 PM<sub>10</sub> 占 20~40% 左右，即使在水膜除尘设备下，大锅炉仍然有 17% 的飞灰随烟气排入大气<sup>[69]</sup>。另外，冬季贴地逆温和低悬逆温的频繁出现，亦加剧了空气污染；秋季浓度在 0.087~0.141 mg/m<sup>3</sup> 之间摆动，季平均浓度为 0.111mg/m<sup>3</sup>，极大值出现在 20 时，次大值出现在 08 时。极小值出现在 14 时，次小值出现在 04 时。秋季 PM<sub>10</sub> 浓度变化与天气条件有关，平均风速较大，空气层结不稳定，易出现沙尘天气；夏季

浓度摆幅较小, 在  $0.046\text{--}0.082\text{mg/m}^3$  之间平缓规律摆动, 季平均浓度为  $0.060\text{ mg/m}^3$ , 极大值出现在 08 时, 次大值出现在 22 时。极小值出现在 15 时, 次小值出现在 03 时。夏季降水较多, 对环境空气有冲刷洁净作用, 据银川市 30 年气象资料统计, 此时段自然降水占全年的 58%, 故夏季污染最轻。

综合分析,  $\text{PM}_{10}$  四季平均污染程度日分布, 春、夏季早晨污染高于傍晚, 冬、秋季早晨污染轻于傍晚; 春季、秋季、夏季中午污染轻于夜间, 冬季则相反。四季平均污染倍数关系分别依次为春季、冬季和秋季是夏季的 3.8 倍、3.2 倍和 1.9 倍。

## 2. $\text{SO}_2$ 季变化

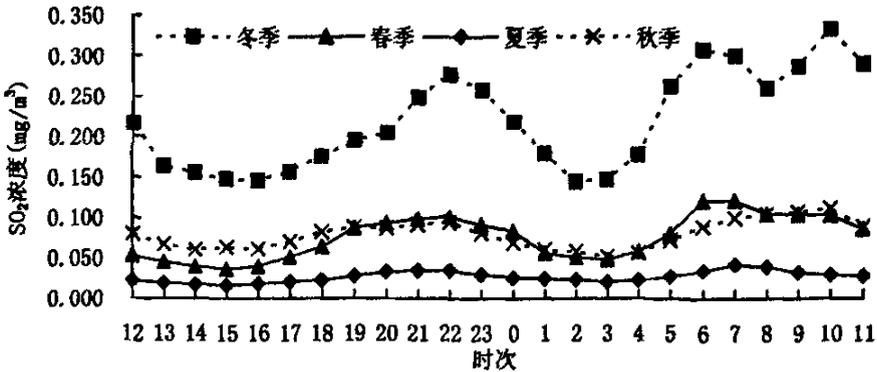


图 5.8 银川市  $\text{SO}_2$  四季变化平均谱图

由  $\text{SO}_2$  四季变化平均谱图 (见图 5.8) 分析可知,  $\text{SO}_2$  浓度冬季明显偏大, 秋、春季较小且浓度值相当, 夏季最小, 季平均浓度依次为  $0.218\text{ mg/m}^3$ 、 $0.079\text{ mg/m}^3$ 、 $0.075\text{ mg/m}^3$  和  $0.026\text{ mg/m}^3$ 。其中, 冬季曲线呈三峰型, 与北京城区污染物气溶胶三峰型质量谱<sup>[70]</sup>较一致, 浓度值由  $0.144\text{ mg/m}^3$  有序增加至  $0.332\text{ mg/m}^3$ , 第一峰值出现在上午 10 时, 第二峰值出现在早晨 06 时, 浓度为  $0.308\text{ mg/m}^3$ , 第三峰值出现在 22 时, 浓度为  $0.277\text{ mg/m}^3$ 。说明  $\text{SO}_2$  源排放上午 10 时左右以工业燃煤锅炉排放为主, 早晨 06 时与傍晚 22 时以生活锅炉、饮食炉灶和工业取暖锅炉综合影响而致。极小值出现在 02 时, 次小值出现在 16 时, 为  $0.145\text{ mg/m}^3$ 。说明冬季主要以高硫煤燃烧排放影响为主; 春、秋季曲线呈双峰双谷型, 秋季曲线与春季相比, 更趋平缓。春季曲线在午后到下午时段小于秋季, 说明春季湍流较大, 对流相对秋季较强, 故此时段春季浓度低于秋季。早晨时段, 春季曲线大于秋季, 说明冬末至初春取暖燃煤仍有一定的排放量; 夏季曲线平缓呈双峰型, 说明  $\text{SO}_2$  源排放稳定、均匀, 浓度摆幅很小, 自  $0.016\text{ mg/m}^3$  逐渐增大到  $0.042\text{ mg/m}^3$ 。高值点分别出现在 07 时和 22 时, 说明其以生活源排放为主。低值点出现在 15 时和 03 时。同样受降水冲刷作用影响, 夏季浓度最小。

综合分析,  $\text{SO}_2$  四季平均污染日分布, 冬、秋、春、夏四季均为早晨污染高于傍晚; 冬、秋季中午污染高于夜间, 春、夏季中午污染轻于夜间。 $\text{SO}_2$  四季平均污染倍数关系依次为冬

季、秋季和春季分别是夏季的 8.4 倍、3 倍和 2.9 倍。

### 3. NO<sub>2</sub> 季变化

同样，由 NO<sub>2</sub> 四季变化平均谱图可知（图 5.9），NO<sub>2</sub> 曲线基本呈双峰型，季平均浓度自大到小依次为冬季 0.045mg/m<sup>3</sup>、春季 0.035mg/m<sup>3</sup>、秋季 0.020mg/m<sup>3</sup>、夏季 0.018mg/m<sup>3</sup>。从冬、春季曲线可看出，傍晚时段（18~23 时）浓度明显高于早晨时段（06~09 时），中午时段（12~15 时）稍低于深夜（00~03 时）时段，其浓度从 16~18 时、22~00 时有一个明显的跃升和跃降过程，说明在这些时段机动车、燃油排放的剧增和剧减。03~07 时缓升及 07~11 时的缓降，均说明工业燃油及采暖锅炉排放在上述时段有序的增加和减少。以 07 时为分界点的污染，前 4 个小时，随着取暖燃煤和机动车排放的逐渐增加及地面逆温的出现，07 时 NO<sub>2</sub> 污染达最高，之后，随着地面温度的升高，逆温的逐渐消失及取暖燃煤排放的逐渐减少，NO<sub>2</sub> 随之减少。01~03 时均有一个小峰，说明冬、春季深夜采暖燃煤仍有一定的排放量。冬季比春季上午 10 时多一个小峰，说明工业燃油及采暖锅炉排放量较大；比较秋、夏季 NO<sub>2</sub> 排放曲线，夏季较秋季波伏稍大，秋季浓度摆幅较小，波峰波谷变化平缓，说明 NO<sub>2</sub> 排放平稳、均匀。

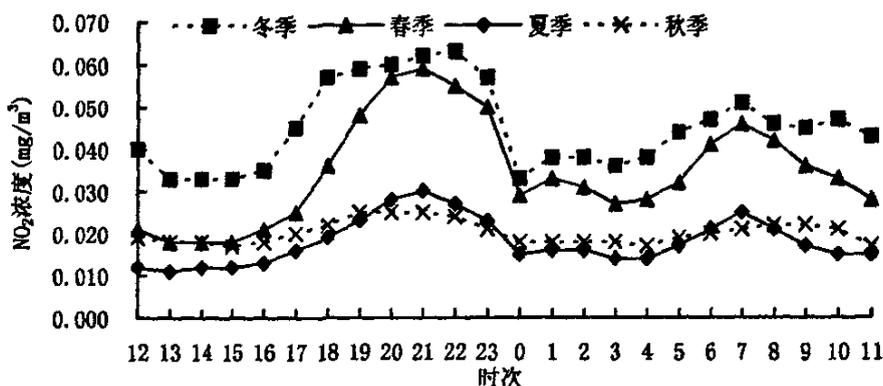


图 5.9 银川市 NO<sub>2</sub> 四季变化平均谱图

综合分析 NO<sub>2</sub> 平均污染倍数关系依次为冬季、春季、秋季分别是夏季的 2.5 倍、1.9 倍和 1.1 倍。四季平均污染程度日分布，冬、春、秋、夏四季均为傍晚污染高于清晨；冬、春季为中午污染轻于夜间，秋季相反，夏季中午与夜间污染基本无差异。以上分析说明，银川市傍晚机动车、燃油、取暖燃煤污染大于清晨。

#### 5.3.4 二氧化硫采暖期与非采暖期分析

为更具针对性的分析 SO<sub>2</sub> 的变化特征，根据 SO<sub>2</sub> 源排放特点，特将银川市 SO<sub>2</sub> 年排放期分为两个时段：一段为采暖期，另一段为非采暖期。通过计算上述两个时段内逐时 SO<sub>2</sub> 浓度数据得到银川市采暖期和非采暖期平均谱图（见图 5.10）。从图中可明显看出，SO<sub>2</sub> 浓度在采暖期呈三峰三谷，其值从 0.125mg/m<sup>3</sup> 有序地增大到 0.288mg/m<sup>3</sup>，平均浓度为 0.192mg/m<sup>3</sup>，

极大值出现在上午 10 时，次大值出现在早晨 6 时，与极大值差  $0.009\text{mg}/\text{m}^3$ ，相对次大值出现在傍晚 22 时，其值为  $0.245\text{mg}/\text{m}^3$ 。中午 15~16 时为一天的最小值，次小值出现在深夜 03 时。第一峰值区出现在 06~10 时之间，说明银川市随着取暖增温和生活饮食的需要导致  $\text{SO}_2$  各种不连续源排放大量增加，如采暖锅炉和燃烧煤、燃油炉灶的排放，紧接着各类工厂的生产，燃煤锅炉和烟囱的排放，加剧了  $\text{SO}_2$  的污染。另一方面，由于地面气温较低，易形成贴地逆温，对流较弱，不利于向上扩散，致使 10 时成为一天中  $\text{SO}_2$  污染最强的时段。中午前后，随着地面气温的逐渐升高，湍流增强，对流充分，垂直输送逐渐加强，致使地面  $\text{SO}_2$  浓度达最低；第二峰值区出现在傍晚（21~23 时）， $\text{SO}_2$  源排放的主要原因与早晨大体相同，但有二个区别：一是工厂燃煤排放大大减少，主要以生活炉灶及取暖锅炉排放为主。另一方面，由于地表面及低层大气温度降低，近地层大气上层空气冷却较慢，对流较弱，从而导致  $\text{SO}_2$  浓度增高。深夜，随着地面辐射冷却的逐渐增加和各种生活炉灶的停止及燃煤排放的逐渐减少，致使 03 时左右  $\text{SO}_2$  源排放成为当日的第二个低点。

在非采暖期， $\text{SO}_2$  曲线为典型的双峰双谷型，无论谷峰谷底均平缓光滑，说明  $\text{SO}_2$  源排放非常均匀、平稳、规律，波动很小，在  $0.023\sim 0.048\text{mg}/\text{m}^3$  之间摆动，平均浓度为  $0.034\text{mg}/\text{m}^3$ 。同样，两个高峰区分别出现在早晨的 08 时和傍晚的 20 时左右，早晨的浓度值略大于傍晚值，低值区深夜的浓度值略大于中午值。

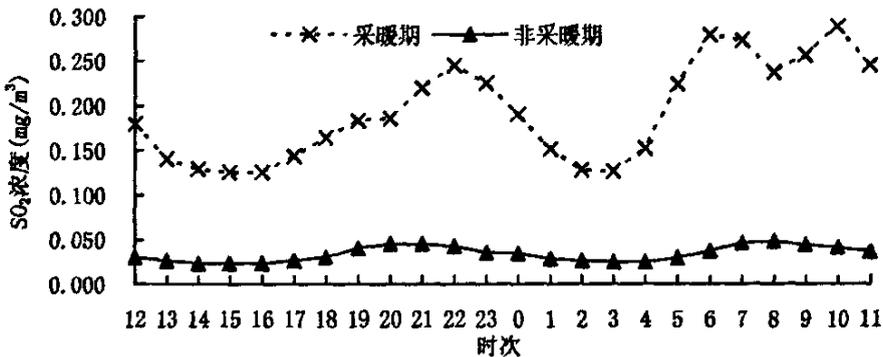


图 5.10 银川市采暖期和非采暖期平均谱图

综合分析  $\text{SO}_2$  在采暖期和非采暖期的特征，其平均污染浓度明显高于非采暖期，且无论采暖期还是非采暖期均为早晨污染高于傍晚，中午污染轻于夜间。

### 5.3.5 近几年银川市空气质量变化特征

空气质量二级以上天数是衡量一个城市是否适合人类居住的主要指标，随着“风城蓝天工程”的实施，银川市环保部门加强燃煤、汽车排污等大气污染的监管力度，积极推行清洁能源的使用，使得银川的天空变得更蓝。

由于治污措施得力，银川市空气质量整体水平改观明显。2001 年银川市空气质量优良

级（即：空气质量级别为一、二级）的天数为 229 天，优良率为 62.7%（空气质量优、良的天数占全年总天数的百分比）；2002 年银川市空气质量为优良级的天数为 277 天，优良率为 75.9%；2003 年银川市空气质量为优良级的天数为 293 天，占全年总天数的 80.3%；2004 年和 2005 年，银川市空气质量为优良级的天数均为 325 天，优良率达 89.0%，在西北五省（区）省会首府城市中名列第一。

## 5.4 本章小结

1. 银川市主要污染物  $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$  有明显的日变化，高污染时段均出现在早晨 08 时和夜间 22 时左右，相对污染较轻时段均出现在深夜 03 时和中午 14 时左右。 $PM_{10}$ 、 $SO_2$  污染早晨高于傍晚， $NO_2$  污染则正好相反。 $PM_{10}$ 、 $SO_2$  年均浓度值超过国家规定的城市功能区的二级标准，属轻度污染； $NO_2$  达到一级标准，空气质量为优。说明日前银川市环境空气主要以自然尘和煤烟型影响为主，首要污染物为  $PM_{10}$ 。

2. 银川市空气污染呈明显的季节变化，其中  $PM_{10}$  春季污染最强，是夏季污染的 3.8 倍， $SO_2$ 、 $NO_2$  冬季污染最强，分别是夏季污染的 8.4 倍和 2.5 倍， $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$  三种主要污染物夏季污染均最轻。

3.  $PM_{10}$  春、夏季节早晨污染高于傍晚，冬、秋季早晨污染轻于傍晚； $SO_2$  一年四季均为早晨污染高于傍晚； $NO_2$  四季均为傍晚污染高于早晨。

4.  $SO_2$  污染采暖期是非采暖期的 4 倍以上，进一步说明采暖和生活燃煤是银川市  $SO_2$  的主要发生源。

5. 综上所述，建议银川市加强冬季  $SO_2$ 、 $NO_2$  污染治理，尤其是生活和采暖燃煤的使用。一方面，倡导使用清洁能源；另一方面，提倡节约能源，因为中国一次能源的 75% 来自燃煤，节约能源本身就可削减排放量，其潜力很大<sup>[71]</sup>。春季需加强对  $PM_{10}$  的治理，一方面，加大城市绿化面积，增加绿地覆盖，发挥生态环境效益；另一方面，做好环境空气质量预测工作，以最大限度减少自然降尘对人体和生物的危害作用。

## 第六章 银川市空气主要污染物浓度与气象条件关系的研究

大量的污染观测事实表明,特定区域里在等量污染源排放时,不同的气象条件下,形成的污染物浓度可相差几倍或几十倍,可见气象条件对污染物的影响非常重要。本章试图结合银川师范学校监测点主要污染物的连续 24 小时观测资料,从大气逆温、大风扬尘和大气降水的不同角度,分析其各自对大气污染物的增加和减少所做的贡献,进而给出贡献率,以期向科学、客观、定量化方向逼近一步。

### 6.1 逆温与空气主要污染物的分析

逆温在空气污染中具有十分重要的作用,某一高度上的逆温层象一个盖子一样阻挡着它下面污染物的扩散,因而可能造成严重的污染,空气污染事件多数发生在有逆温层和静风条件下,以下讨论的主要是贴地逆温对主要污染物的影响。

#### 6.1.1 逆温频率与 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 月变化关系

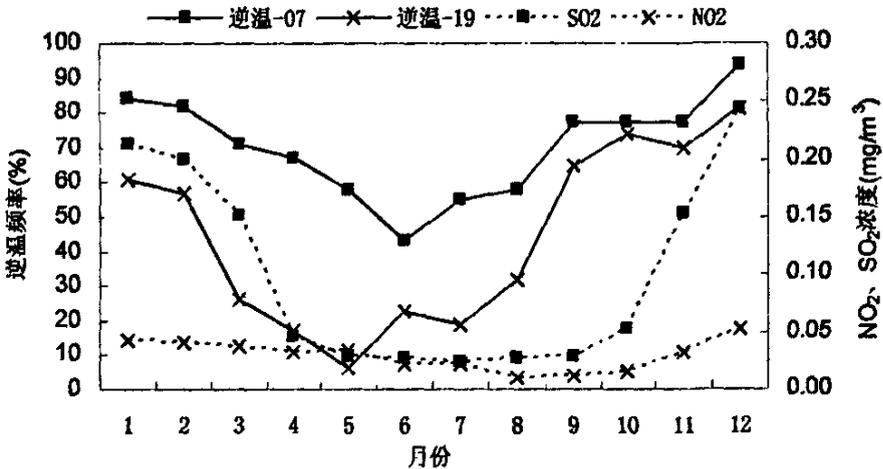


图 6.1 银川市贴地逆温累积频率与  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  月变化图

将统计年内逐日 07 时与 19 时出现贴地逆温次数按月累积,再与逐月  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  平均浓度迭加,得到一张逆温累积频率与  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  月变化关系图(见图 6.1),从图 6.1 可清楚地看到,逆温频率 07 时明显大于 19 时,正反映了早晨湍流较傍晚小,对流较傍晚弱的特点。两条曲线走向趋势,均以 12 月份为拐点,6~12 月渐升,12~5 月渐降。07 时曲线,极大值出现在 12 月份,频率为 94%,极小值出现在 6 月,频率为 43%,除 6 月份外,全年其它月份逆温出现频率均超过 50%,全年出现贴地逆温的频率为 70%;19 时曲线,最大值同样出现在 12 月份,频率为 81%,最小值出现在 5 月,频率为 6%,秋、冬季逆温出现频率均超过 50%,春、夏季逆温出现频率均小于 40%,19 时全年出现贴地逆温频率为 44%。对于

秋、冬季节，早晨、傍晚逆温出现频率高，进一步说明在此季节在此时段湍流小、对流弱的天气特点。夏季早、晚逆温出现频率均较低，说明在此季节气温偏高，湍流较大，对流较强。春季早、晚逆温频率的差异，正说明早晨气温偏低，大气层结较稳定，故逆温出现次数多，傍晚湍流旺盛，对流充分，大气处于极不稳定状态，故逆温出现次数少。同时，从图 6.1 可明显看出，SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 逐月平均浓度极大值均出现在 12 月份，6~12 月渐升，12~5 月渐降，夏半年浓度明显小于冬半年。以上说明进一步印证了贴地逆温对污染物的浓度有直接增加的作用。

### 6.1.2 逆温厚度

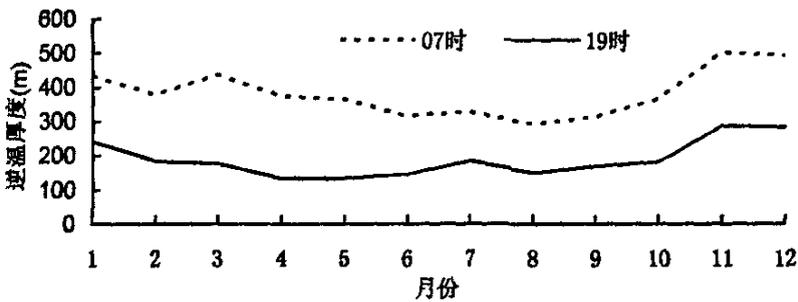


图 6.2 银川市贴地逆温厚度变化图

同样，将统计年内逐日 07 时与 19 时出现贴地逆温的厚度累加平均，得到一张银川市贴地逆温的厚度变化图（见图 6.2），从图中可看出，07 时与 19 时厚度曲线变化趋势均为同位相，峰值均出现在 11 月份，厚度分别为 07 时 500.3 米、19 时 287.1 米，12 月份均为次大值，厚度与极大值相比仅相差不到 10 米，极小值出现月份稍有差异，19 时出现在 5 月，07 时出现在 8 月，厚度分别为 133 米和 292.2 米，早晨与傍晚年出现逆温的平均厚度分别为 382.8 米和 188.6 米。

### 6.1.4 逆温与主要污染物关系分析

为找寻逆温与主要污染物 PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 的关系，特将统计年内逐日 07 时出现贴地逆温的主要污染物日平均浓度与未出现贴地逆温的日平均浓度进行对比分析，绘制一张综合表征主要污染物有、无逆温时质量浓度的月变化谱图（见图 6.3），从图 6.3 中可看出，PM<sub>10</sub> 曲线除冬末至整个春季未出现逆温浓度高于出现逆温时浓度外，其余季节有逆温时浓度均高于无逆温时浓度，春季 PM<sub>10</sub> 偏大，主要由于大风吹起沙尘影响所致。全年两者之间差异不大，有逆温时浓度与无逆温时浓度仅相差 0.001mg/m<sup>3</sup>，秋、冬、夏三季有逆温时浓度比无逆温时浓度相应高出 0.029mg/m<sup>3</sup>、0.026mg/m<sup>3</sup>、0.015mg/m<sup>3</sup>、春季反减少 0.067mg/m<sup>3</sup>；对于 SO<sub>2</sub>，出现逆温时浓度曲线明显高于未出现逆温曲线，平均高出 0.027mg/m<sup>3</sup>，12 月份最为明显，高出 0.078mg/m<sup>3</sup>。SO<sub>2</sub> 有逆温时浓度各季均大于无逆温时浓度，冬、秋、春、夏分

别相应高出  $0.044\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $0.033\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $0.024\text{mg}/\text{m}^3$ 、和  $0.008\text{mg}/\text{m}^3$ ；同样  $\text{NO}_2$  曲线，出现逆温时浓度亦高于未出现逆温时浓度，年均高出  $0.006\text{mg}/\text{m}^3$ ，仅因图形比例关系，6~10 月曲线近于重合。 $\text{NO}_2$  有逆温时浓度各季均大于无逆温时浓度，春、冬、秋、夏分别高出  $0.014\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $0.005\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $0.003\text{mg}/\text{m}^3$ 、和  $0.003\text{mg}/\text{m}^3$ 。

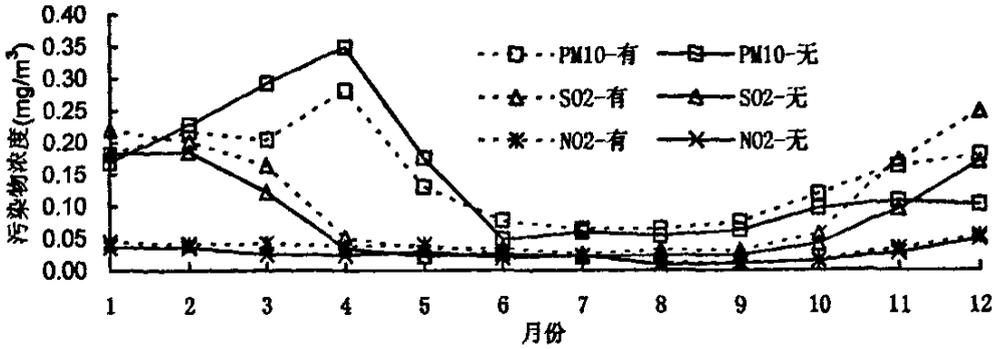


图 6.3 银川市主要污染物有、无逆温的污染浓度月变化谱图

综合比较出现逆温与未出现逆温时浓度，对于  $\text{PM}_{10}$  秋、夏、冬季分别高出 33%、28% 和 17%，仅此三季节就平均高出 26%； $\text{SO}_2$  秋、春、夏、冬分别高出 62%、41%、35%和 25%，平均高出 40%； $\text{NO}_2$  春、夏、秋、冬分别高出 54%、18%、17%和 12%，平均高出 25%。

## 6.2 自然降水对污染物的冲刷作用

自然降水对大气的清洁作用实际上是一种湿清除（或湿沉降）过程，清除过程是维持大气成分相对稳定的重要因子，若没有清除过程，许多大气成分将因地表源的不断排放而迅速累积。以下所讨论的湿清除过程，是通过降落的水汽凝结体（如雨滴等）把大气中微量成分（固体颗粒物  $\text{PM}_{10}$ 、微量气体  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  等）带到地面使之从大气中消失的过程。由于  $\text{SO}_2$  在大气中存在的时间较短（仅存在 1~2），在湿度较大的情况下，与水发生化学反应，生成固态硫酸盐粒子，同样大气中  $\text{NO}_2$  也可与水分子作用形成硝酸，因此，对于大气中微量气体来讲，湿清除过程在某种程度上可以说是一种复杂的化学转化过程<sup>[72]</sup>。另外，降水可大大减少与生产、交通、建筑等人为活动相关的扬尘，天空云量直接削弱太阳辐射强度抑制了气溶胶粒子的光化学反应机制<sup>[73]</sup>。

为分析自然降雨对银川市主要污染物的影响，特将 2005 年日降雨量大于 2 毫米，且连续降雨三小时的降水过程与三种主要污染物进行对比分析（见表 6.1），统计分析的 12 次降雨过程主要分布在 2005 年 5~9 月间，日降雨量在 2.9~28.5 毫米之间，日过程平均雨强在 0.5~2.2mm/h 之间，统计中以降水当日实测污染物浓度为日均值，以当月的污染物浓度月均值为标准，定义自然降水对大气清洁的贡献率为：

$$C = \frac{\rho_m - \rho_d}{\rho_m} \times 100\%$$

式中  $C$  为自然降水对大气清洁的贡献率 (%)； $\rho_d$  为有降水时当日的污染物日均浓度值； $\rho_m$  为当月污染物月均浓度值。

由表 6.1 可知，降水对三种污染物冲刷的贡献率  $PM_{10}$  为 3~56%，平均 31%， $SO_2$  贡献率为 4~71%，平均 34%， $NO_2$  为 8~55%，平均 35%。与北京地区秋季连续三日降水使气溶胶净化到 7% 相比<sup>[74]</sup>，该贡献率尚偏小，但从本文所取降水日过程来讲，该贡献率又较正常。分析表 6.1 中三种污染物出现负贡献的原因，一是产生降水当日污染物浓度本身就偏高；二是降水发生时间正好处于日均污染物浓度较低时段。

表 6.1 银川市自然降水对大气清洁的贡献表 浓度单位： $mg/m^3$

| 日期   | 日雨量<br>mm | 雨强<br>mm/h | $PM_{10}$ |       |            | $SO_2$ |       |            | $NO_2$ |       |            |
|------|-----------|------------|-----------|-------|------------|--------|-------|------------|--------|-------|------------|
|      |           |            | 日均值       | 月均值   | 贡献率<br>(%) | 日均值    | 月均值   | 贡献率<br>(%) | 日均值    | 月均值   | 贡献率<br>(%) |
| 4.23 | 8.7       | 1.1        | 0.289     | 0.304 | 5          | 0.022  | 0.046 | 51         | 0.021  | 0.032 | 34         |
| 5.24 | 3.8       | 0.5        | 0.067     | 0.145 | 54         | 0.028  | 0.029 | 4          | 0.023  | 0.035 | 35         |
| 6.03 | 17.2      | 1.4        | 0.026     | 0.059 | 56         | 0.016  | 0.028 | 42         | 0.013  | 0.022 | 38         |
| 6.25 | 7.2       | 0.9        | 0.040     | 0.059 | 33         | 0.019  | 0.028 | 30         | 0.011  | 0.022 | 49         |
| 7.27 | 8.0       | 2.0        | 0.060     | 0.062 | 3          | 0.013  | 0.024 | 46         | 0.022  | 0.022 | 0          |
| 8.01 | 7.1       | 1.2        | 0.063     | 0.060 | -5         | 0.026  | 0.028 | 7          | 0.012  | 0.010 | -17        |
| 8.07 | 28.5      | 2.2        | 0.031     | 0.060 | 48         | 0.017  | 0.028 | 41         | 0.005  | 0.010 | 55         |
| 8.08 | 2.9       | 0.7        | 0.054     | 0.060 | 10         | 0.023  | 0.028 | 18         | 0.008  | 0.010 | 26         |
| 8.17 | 11.3      | 1.4        | 0.035     | 0.060 | 42         | 0.013  | 0.028 | 54         | 0.015  | 0.010 | -33        |
| 9.04 | 7.5       | 0.6        | 0.048     | 0.072 | 33         | 0.009  | 0.029 | 71         | 0.008  | 0.012 | 33         |
| 9.24 | 3.9       | 0.6        | 0.052     | 0.072 | 27         | 0.031  | 0.029 | -6         | 0.011  | 0.012 | 8          |
| 9.26 | 18.4      | 1.4        | 0.050     | 0.072 | 31         | 0.023  | 0.029 | 23         | 0.013  | 0.012 | -8         |

### 6.3 $PM_{10}$ 与扬沙、浮尘、风速等气象条件的关系

为分析首要污染物  $PM_{10}$  与风速、扬沙、浮尘、沙尘暴的关系，本文特将统计年内所出现浮尘、扬沙、沙尘暴天气时首要污染物  $PM_{10}$  的浓度进行统计，其值分别为  $0.351mg/m^3$ 、 $0.308mg/m^3$ 、 $0.305mg/m^3$ ，其相应平均风速为 3.3 m/s、4.3 m/s、4.9m/s，即在这三种天气条件下，浮尘污染浓度最大，且风速最小，扬沙风速较大，污染次之，沙尘暴平均风速最大，污染相对较轻。

表 6.3 银川市首要污染物 PM<sub>10</sub> 等级与风速、扬沙、浮尘、沙尘暴出现几率表

| 等级  | 风速  | 沙尘暴 | 百分率 | 扬沙 | 百分率  | 浮尘 | 百分率  | 大风 | 百分率  |
|-----|-----|-----|-----|----|------|----|------|----|------|
| I   | 2.6 | 0   | 0.0 | 0  | 0.0  | 0  | 0.0  | 0  | 0.0  |
| II  | 2.4 | 1   | 0.5 | 3  | 1.5  | 6  | 3.0  | 5  | 2.5  |
| III | 2.7 | 1   | 0.9 | 14 | 13.0 | 6  | 5.6  | 10 | 9.3  |
| IV  | 3.8 | 0   | 0.0 | 2  | 66.7 | 2  | 66.7 | 2  | 66.7 |
| V   | 3.7 | 1   | 8.3 | 6  | 50.0 | 10 | 83.3 | 2  | 16.7 |
| 春季  | 3.2 | 3   | 3.3 | 19 | 20.7 | 19 | 20.7 | 9  | 9.8  |

为统计方便特将 PM<sub>10</sub> 按等级（等级划分参见表 7.1）与这些气象条件对应统计列表如下（见表 6.3），从表 6.2 和表 6.3 中即可看出扬沙、浮尘、沙尘暴和大风（指瞬时风速达到或超过 17.0m/s 的风）在一定条件下属共生伴随现象，为此专门将春季出现的这四种天气现象一并在表 6.3 中列出。从表 6.3 中可知，PM<sub>10</sub> 等级与日平均风速的关系，当 PM<sub>10</sub> 从 I 级到 II 级时，随着风速的减少 PM<sub>10</sub> 浓度在增加，从 III 级到 V 级，随着浓度的增加，日平均风速在同步增长。风速此种变化符合其扩散规律，假定源排放一定时，在阈值风速<sup>[73]</sup>内，随着风速逐渐增大，污染物扩散能力也增强，污染浓度在逐渐减少。随着风速逐渐减少，污染浓度也在不断增加，达静风时，污染浓度也达最大；当风速超过一定阈值时，地面各种尘被卷入空中，随着风速的进一步增大，污染浓度也逐渐增加。

表 6.4 银川市首要污染物 PM<sub>10</sub> 等级与扬沙、浮尘、沙尘暴定量关系表 浓度单位：mg/m<sup>3</sup>

| PM <sub>10</sub> 等级 | I     | II    | III   | IV    | V     |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 无沙尘日                | 0.043 | 0.093 | 0.213 | 0.000 | 0.000 |
| 有沙尘日                | 0.000 | 0.115 | 0.252 | 0.395 | 0.554 |
| 浓度增加率               | 0     | 24%   | 18%   | 100%  | 100%  |

同时，从表 6.3 还可看出，当 PM<sub>10</sub> 为 I 级时，上述四种天气现象未出现一次；当 PM<sub>10</sub> 为 II 级时，浮尘的出现几率最大仅为 3%；当 PM<sub>10</sub> 为 III 级时，扬沙出现的几率最大为 14%；当 PM<sub>10</sub> 为 IV 级时，扬沙、浮尘、大风出现几率均为 66.7%；当 PM<sub>10</sub> 为 V 级时，浮尘出现几率最大为 83.3%。在 PM<sub>10</sub> 超标日数中，扬沙、浮尘、大风、沙尘暴出现几率分别为 18%、15%、11%、1.6%，其各自出现次数占年出现总次数几率分别为 88%、75%、74%、67%。春季扬沙、浮尘出现的几率均为 20.7%，而春季出现沙尘暴、浮尘、扬沙、大风次数各占其年出现总次数的几率分别为 100%、79%、76%、47%。

由此可见，上述四种天气现象的出现直接导致春季 PM<sub>10</sub> 浓度达到全年四季最大值。为使所讨论的四种天气现象产生沙尘增加空气污染有一个定量的概念，特定义凡出现上述四种

天气现象的日期为沙尘日，未出现上述四种天气现象的日期为无沙尘日，并据此统计相应PM<sub>10</sub>浓度列表如下（见表 6.4），从表 6.4 可知，当 PM<sub>10</sub> 为 I 级时，由于未出现沙尘日，污染浓度增加率为零，由于沙尘日的出现直接导致 PM<sub>10</sub> II、III 级平均污染浓度分别增加 24% 和 18%，IV、V 级的出现完全为沙尘天气所致。进一步统计 PM<sub>10</sub> 有沙尘日平均浓度为 0.311mg/m<sup>3</sup>，与春季 PM<sub>10</sub> 平均浓度相比增加了 38%。

### 6.4 污染超标的天气分析

从近 5 年的资料中，我们选取了 PM<sub>10</sub> 超标日 108 个、SO<sub>2</sub> 超标日 79 个进行天气个例分析，在统计时段内 NO<sub>2</sub> 未出现超标。结果表明，造成银川市污染超标的天气过程主要有 5 种类型：西北气流型、冷槽东移型、冷空气穿脊东移型、纬向气流型、西南气流型。从表 6.5 看出，西北气流型和冷槽东移型造成污染超标的频率较多。

表 6.5 银川市空气质量超标的天气分型频率表

| 污染物超标率(%)             | 西北气流型 | 冷槽东移型 | 冷空气穿脊东移型 | 纬向气流型 | 西南气流型 |
|-----------------------|-------|-------|----------|-------|-------|
| PM <sub>10</sub> 超标频率 | 53    | 36    | 7        | 3     | 1     |
| SO <sub>2</sub> 超标频率  | 75    | 16    | 8        | 1     | 1     |

#### 6.4.1 西北气流型的污染机制

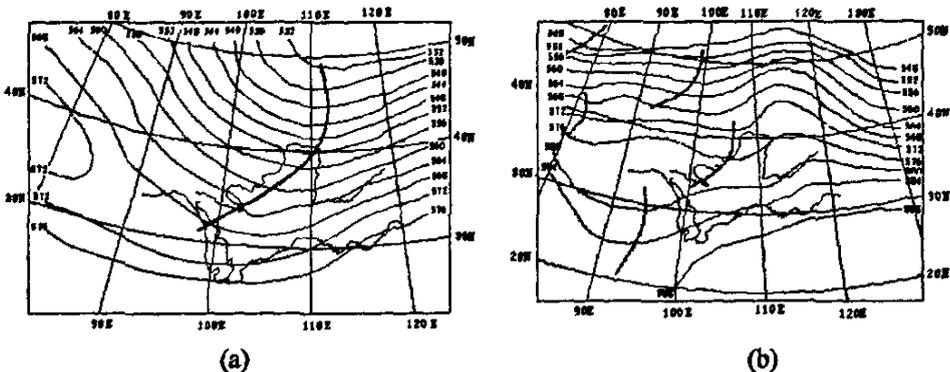


图 6.4 08 时 500hPa 天气形势图  
(a)2004 年 11 月 19 日；(b)2001 年 10 月 19 日

这种天气类型又可分为两种情况：一种是强西北气流，这种情况一般高空风速大，维持时间较短，地面受冷高压控制，常随动量下传午后风速较大，造成 PM<sub>10</sub> 和 SO<sub>2</sub> 超标的原因也是两方面的，一方面：晚上到早晨地面由冷高压控制形成比较强的逆温层，污染物不容易扩散；另一方面午后大风又容易引起浮尘、扬沙天气，引起 PM<sub>10</sub> 的浓度增大，造成超标。如图 6.4(a)是 2004 年 11 月 19 日 PM<sub>10</sub> 超标时 500hPa 天气形势图。从图中看到，宁夏及上游地区为一致的强西北气流控制，并且等高线比较密集，风速较大，动量下传造成大风扬沙天

气，从而引起 PM<sub>10</sub> 超标。

另一种是持续时间较长的西北气流，这种情况下气层稳定逆温层较厚，污染物随着稳定的天气条件有不断累积的过程。随着污染物浓度的加大，一般持续 3~5 天后易造成超标且持续时间长。如图 6.4(b)是 2001 年 10 月 19 日 500hPa 天气形势图，这天逆温强度大、维持高度较高，使得污染物累积时间长，致使 SO<sub>2</sub> 超标浓度明显。

#### 6.4.2 冷槽东移型天气的污染机制

在乌拉尔山到贝加尔湖有一深厚大槽，或在新疆到河西为一中尺度槽区，冷空气东移速度缓慢，地面冷锋势力较强但移动速度缓慢，银川市处于锋前的鞍型场或均压区，地面有弱辐合，但垂直对流弱，逆温较薄但强度大，易造成污染物堆积，锋面过境又常伴有大风或沙尘天气，从而引起污染物浓度超标。冷空气过后，PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub> 含量迅速下降。在 2001 年 10 月 19 日 08 时 500hPa 天气形势图上（图略），贺兰山西侧有一明显槽区，并在新疆以北有冷空气补充。当天 02、08、14、20 时大气稳定度分别属于 E、D、B、F，气层弱不稳定，08 时地面逆温厚度 161m，强度 2.4℃/100m，20 时地面逆温厚度 235m，强度 0.7℃/100m，造成 PM<sub>10</sub> 超标，20 日冷槽过后，污染物浓度恢复正常。

#### 6.4.3 冷空气穿脊东移型天气的污染机制

此种天气的特征是：前期上游为一弱高压脊，银川市处于弱的西北气流中，在新疆附近有冷空气穿脊东移，在地面形势图中银川市处于均压场或弱低压中，由于冷空气势力不是很强，常常分股东移，在冷空气不断分股东移的过程中逐渐削弱高压脊，甚至逐渐形成纬向气流，在冷空气过境时地面风速常常达到 4~5 级，地面常有冷锋或弱冷锋配合，银川市常处在锋前弱低压或均压区中，空气垂直运动弱，使污染物不易扩散而造成超标现象。图 6.5 是 2001 年 02 月 16 日 08 时 500hPa 天气图，从图中看到有分股冷空气正在东移，并有小槽与之配合，02、08、14、20 时大气稳定度分别属于 E、E、D、E，气层稳定，08 时地面有 1515m、强度为 0.6℃/100m 的强逆温层，污染物不易扩散，造成 SO<sub>2</sub> 超标。

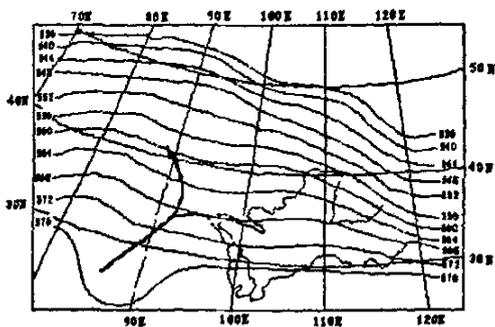


图 6.5 2001 年 02 月 16 日 08 时 500hPa 天气形势图

#### 6.4.4 纬向气流型天气的污染机制

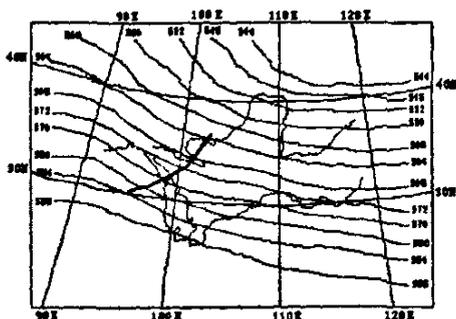


图 6.6 2002 年 12 月 12 日 08 时 500hPa 天气形势图

中纬度一带气流较为平直，常有小波动东移，但速度较慢，平直气流维持时间长，地面也表现为均压场或小范围的高低压，图 6.6 是 2002 年 12 月 12 日-15 日 500hPa 的天气图，为比较典型的纬向气流型的天气形势。此种天气形势下，大气水平、垂直运动都较小，逆温层较厚且强度较大，污染物堆积不易扩散。虽然此种天气形势频率少，但维持时间较长，污染物的累积时间长，浓度大，一旦天气条件有较大调整时，污染物的浓度也随之下降。

#### 6.4.5 西南气流型天气的污染机制

南支气流较强且维持时间长，空气中水汽含量较大，气层稳定，垂直运动小，造成污染物滞留在空气中不易扩散。而此时空气中的污染物大多是以水汽为主的各种粒子，随着南支气流的减弱和中断，其浓度一般也随之下降，达到正常值。如从 2003 年 11 月 12 日 08 时 500hPa 天气形势图上看到（图略），宁夏及上游为较为平直的弱西南气流，维持 3 天后才转型，在维护阶段造成  $PM_{10}$  污染浓度的超标。

### 6.5 本章小结

1. 银川市早晨、傍晚出现贴地逆温的几率 12 月份最大，夏季较小，与银川市主要污染物冬季污染最强，夏季污染较轻的监测结论相一致。全年早晨、傍晚出现贴地逆温的几率分别为 70%和 44%。
2. 银川市逆温厚度 11~12 月最大，5~6 月相对较小，早晨、傍晚逆温平均厚度分别为 383 米和 189 米左右。
3. 银川市因出现贴地逆温而导致环境空气污染增加的贡献率， $PM_{10}$  秋、冬、夏三季平均增加 26%， $SO_2$  和  $NO_2$  全年分别增加 40%和 25%。
4. 自然降水对大气清洁的贡献作用非常明显，平均一次过程将直接减轻  $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$  污染达 33%。
5. 银川市地处西北干旱地区，浮尘、扬沙、沙尘暴、大风天气对其环境空气的直接影响非常明显（尤其春季），其中浮尘天气导致  $PM_{10}$  污染最重，扬沙天气次之，沙尘暴天气相对较轻，随着其出现几率的不断增大，环境空气质量的等级也在随之增加，仅仅受上述四种天气出现的影响，直接导致  $PM_{10}$  II-III 级平均污染浓度增加 21%，IV、V 级的出现完全为沙尘天气所致。沙尘日平均浓度与春季  $PM_{10}$  浓度相比，直接导致污染增加了 38%。

6. 造成银川市污染超标的天气过程主要有 5 种类型：西北气流型、冷槽东移型、冷空气穿脊东移型、纬向气流型、西南气流型。

7. 通过对各种与超标有关的天气形势下的污染机制进行了分析，认为主要有以下两面的原因：一是由于锋面过境或高空风动量下传造成地面风速较大卷起地面或邻近地区的沙尘飘向银川市上空造成超标，如西北气流型、冷槽东移型。二是由于天气形势比较稳定且维持时间较长，对流较弱，造成污染物堆积而引起超标，如纬向气流型、西南气流型。但也有是由于以上两方面的原因造成超标如冷槽东移型，在平均风力较大的情况下对流又相对较弱，而在银川冬半年这种天气形势是最常见的形势。

## 第七章 银川市空气污染预报系统的建立与应用

### 7.1 污染指数的概念及其确定原则

表 7.1 空气污染指数一览表

| 污染物名称            | 浓度范围<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 指数<br>(API) | 空气质量级<br>别 | 质量描述 | 空气污染潜势预报用语 |
|------------------|------------------------------|-------------|------------|------|------------|
| PM <sub>10</sub> | 0.000~0.050                  | ≤50         | I          | 优    | 不会造成空气污染   |
|                  | 0.051~0.150                  | 51~100      | II         | 良    | 不易造成空气污染   |
|                  | 0.151~0.250                  | 101~200     | III        | 轻度污染 | 容易造成空气污染   |
|                  | 0.251~0.420                  | 201~300     | IV         | 中度污染 | 极易造成空气污染   |
|                  | 0.421~0.500                  | 301~400     | V          | 重度污染 |            |
|                  | 0.501~0.600                  | 401~500     |            |      |            |
| SO <sub>2</sub>  | 0.000~0.050                  | ≤50         | I          | 优    | 不会造成空气污染   |
|                  | 0.051~0.150                  | 51~100      | II         | 良    | 不易造成空气污染   |
|                  | 0.151~0.700                  | 101~200     | III        | 轻度污染 | 容易造成空气污染   |
|                  | 0.701~1.600                  | 201~300     | IV         | 中度污染 | 极易造成空气污染   |
|                  | 1.601~2.100                  | 301~400     | V          | 重度污染 |            |
|                  | 2.201~2.620                  | 401~500     |            |      |            |
| NO <sub>2</sub>  | 0.000~0.040                  | ≤50         | I          | 优    | 不会造成空气污染   |
|                  | 0.041~0.080                  | 51~100      | II         | 良    | 不易造成空气污染   |
|                  | 0.081~0.240                  | 101~200     | III        | 轻度污染 | 容易造成空气污染   |
|                  | 0.241~0.565                  | 201~300     | IV         | 中度污染 | 极易造成空气污染   |
|                  | 0.566~0.750                  | 301~400     | V          | 重度污染 |            |
|                  | 0.751~0.940                  | 401~500     |            |      |            |

空气污染指数 (Air Pollution Index, 简称 API) 是一种反映和评价空气质量的方法, 是将常规监测的几种空气污染物的浓度简化成为单一的概念性数值形式, 以分级表征空气质量状况与空气污染的程 度。空气污染指数简明直观, 使用方便, 适用于表示城市的短期空气质量状况和变化趋势, 表 7.1 给出了空气污染物浓度值与 API 指数对比表。

污染浓度与污染指数可用下式转化:

$$I_i = \frac{(C_i - C_n)}{(C_{n+1} - C_n)}(I_{n+1} - I_n) + I_n$$

式中： $I_i$ 为某污染物污染指数； $C_i$ 为某污染物浓度； $I_n$ 、 $I_{n+1}$ 分别为第  $n$ 、 $n+1$  转折点的指数； $C_n$ 、 $C_{n+1}$ 分别为第  $n$ 、 $n+1$  转折点的浓度值。

空气污染指数是根据环境空气质量标准和各项污染物对人体健康和生态环境的影响来确定污染指数的分级及相应的污染物浓度限值。根据我国空气污染的特点和污染防治工作的重点，目前计入空气污染指数的污染物项目为： $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 和 $NO_2$ 。随着环境保护工作的深入和人民生活水平的提高，可调整增加其它污染监测项目，以适应发展的需要。

空气质量的好坏取决于各种污染物中危害最大的污染物的污染程度。污染指数与各项污染物浓度的关系是分段函数关系，取各项污染物分指数中最大者代表该区域或城市的污染指数，即：

$$API = \max(I_1, I_2, \dots, I_i, \dots, I_n)$$

该指数所对应的污染物即为该区域或城市的首要污染物，当污染指数 API 值小于 50 时，不报告首要污染物，首要污染物各级指数与人体健康对照表如表 7.2 所示：

表 7.2 空气污染指数及其对健康影响对照表

| 污染指数    | 对健康的影响                             | 建议采取的措施                        |
|---------|------------------------------------|--------------------------------|
| 0~50    | 可正常活动                              | 不需采取保护措施                       |
| 51~100  |                                    |                                |
| 101~200 | 易感人群症状有轻度加剧，健康人群出现刺激症状             | 心脏病和呼吸系统疾病患者应减少体力消耗和户外活动       |
| 201~300 | 心脏病和肺病患者症状显著加剧，运动耐受力降低，健康人群中普遍出现症状 | 老年人和心脏病、肺患者应停留在室内，并减少体力活动      |
| 大于 300  | 健康人运动耐受力降低，有明显强烈症状，提前出现某些疾病        | 老年人和病人应留在室内，避免体力消耗，一般人群应避免户外活动 |

世界上许多国家和地区已开展了空气污染指数的周报、日报和预报工作。如美国、英国和我国的台湾地区采用的是 PSI 指数 (Pollutant Standard Index)，我国的香港和大陆地区则采用 API 指数。PSI 和 API 大同小异，公仅在污染物监测项目和评价标准方面稍有不同而已。

## 7.2 银川市空气污染数值预报模式

银川市空气污染数值预报模式采用的中国气象科学研究院徐大海、朱蓉等人研制的城市

大气污染潜势和污染指数预报系统 CAPPS (City Air Pollution Prediction System), 该系统分气象场预报和空气污染潜势预报及空气质量预报两部分, 气象场预报采用 MM5 中尺度预报模式, 污染潜势和污染指数预报采用了大气平流扩散的非静稳多箱模型。该模式预报的空气污染潜势能较好地反映实际气象条件下的通风扩散稀释和干、湿沉降消除大气污染物的总能力, 在国家环保总局和中国气象局联合发布文件 (环发[2000]231 号) “关于开展环境保护重点城市空气质量预报工作的通知” 中, 被列为推荐使用的城市空气质量预报模式之一。

### 7.2.1 大气污染平均浓度预报方程

设大气污染浓度  $c$  是由  $\tau$  体积内若干位于  $\bar{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$  源强分别为  $q_i$  产生, 风速为  $\bar{V}$ , 湍流交换系数为二阶张量  $\bar{k}$ , 干沉降速度为  $\bar{v}_d$ , 湿沉降速度为  $\bar{v}_w$ ,  $\bar{v}_d$  和  $\bar{v}_w$  只有铅直方向分量且指向地面, 降水率为  $R$ , 降水清洗比为  $w_r$ , 则大气中气载污染物不考虑化学反应的平流扩散方程为<sup>[76]</sup>:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla c = \sum q_i \delta(\bar{r}_i) - \nabla \cdot (c\bar{v}_d) - \nabla \cdot (c\bar{v}_w) + \nabla \cdot \bar{k} \cdot \nabla c \quad (7.1)$$

其中,  $\bar{v}_w$  的值等于降水率和降水清洗比  $w_r R$  的乘积:

$$\bar{v}_w = w_r R \quad (7.2)$$

对式 (7.1) 在体积  $\tau$  内积分后再对体积求平均, 可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{1}{\tau} \iiint_{\tau} \bar{V} \cdot \nabla c d\tau &= \frac{1}{\tau} \iiint_{\tau} \sum q_i \delta(\bar{r}_i) d\tau - \\ &\frac{1}{\tau} \iiint_{\tau} \nabla \cdot (c\bar{v}_d + c\bar{v}_w) d\tau + \frac{1}{\tau} \iiint_{\tau} \nabla \cdot \bar{k} \cdot \nabla c d\tau \end{aligned} \quad (7.3)$$

其中:

$$\bar{c} = \frac{1}{\tau} \iiint_{\tau} c d\tau \quad (7.4)$$

根据数学矢量运算法则, 有  $\bar{V} \cdot \nabla c = \nabla \cdot (\bar{V}c) - c\nabla \cdot \bar{V}$ 。假定大气是不可压流体, 故  $\nabla \cdot \bar{V} = 0$ , 那么式 (7.3) 左方第二项可写为:

$$\frac{1}{\tau} \iiint_{\tau} \bar{V} \cdot \nabla c d\tau = \frac{1}{\tau} \iiint_{\tau} \nabla \cdot (\bar{V}c) d\tau = \frac{1}{\tau} \oint_{\bar{s}} c\bar{V} \cdot d\bar{s} \quad (7.5)$$

式 (7.5) 的最右方为曲面积分,  $\bar{s}$  为包围体积  $\tau$  的表面, 其法线方向指向体积外为正, 式 (7.3) 右方第一项为体积  $\tau$  内单位时间大气污染物排放 (包括点源、面源与线源排放) 的总量  $Q$ , 即:

$$\frac{1}{\tau} \iiint_V \sum_i q_i \delta(\bar{r}_i) d\tau = \sum_i q_i = Q \quad (7.6)$$

式(7.3)右方第二项为体积 $\tau$ 内大气污染源的干、湿清除项:

$$\frac{1}{\tau} \iiint_V \nabla \cdot (c\bar{v}_a + c\bar{v}_w) d\tau = \frac{1}{\tau} \oint_S c(\bar{v}_a + \bar{v}_w) \cdot d\bar{s} \quad (7.7)$$

式(7.3)右方第三项为湍流通量项,在城市尺度、中等风速的条件下该项的大小约为平流项的百分之几,可以忽略,但在小风速或静风条件下该项必须保留,因为按原始定义,湍流通量可表达为:

$$-\bar{k} \cdot \nabla c = \bar{i} \overline{u'c'} + \bar{j} \overline{v'c'} + \bar{k} \overline{w'c'} \quad (7.8)$$

若将湍流通量用虚拟湍流输送速度 $\bar{V}_t = \bar{i}u + \bar{j}v + \bar{k}w$ 表示,则式(7.8)可改写为:

$$-\bar{k} \cdot \nabla c = \bar{V}_t c \quad (7.9)$$

因此:

$$\frac{1}{\tau} \iiint_V \nabla \cdot \bar{k} \cdot \nabla c d\tau = -\frac{1}{\tau} \iiint_V \nabla \cdot (\bar{V}_t c) d\tau = -\frac{1}{\tau} \oint_S \bar{V}_t c \cdot d\bar{s} \quad (7.10)$$

于是式(7.3)可写为:

$$\tau \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = Q - \oint_S c(\bar{V} + \bar{V}_t + \bar{v}_a + \bar{v}_w) \cdot d\bar{s} \quad (7.11)$$

上式就是平均浓度的预报方程,它的最右方的积分项表示体积 $\tau$ 内大气对污染物的清除能力,这些清除是由通风扩散稀释和干湿沉降过程决定的。若设积分值对平均浓度的比值为:

$$V_c = \frac{1}{\bar{c}} \oint_S c(\bar{V} + \bar{V}_t + \bar{v}_a + \bar{v}_w) \cdot d\bar{s} \quad (7.12)$$

$\bar{V}_c$ 代表该时段的大气通风扩散稀释和干湿沉降的总能力的平均值。将式(7.12)代入式(7.11)

可解得:

$$\bar{c} = e^{-\frac{1}{\tau} \int_0^{\delta T} V_c dt} \left( \frac{1}{\tau} \int_0^{\delta T} Q e^{\frac{1}{\tau} \int_0^t V_c dt} dt + \bar{c}_0 \right) \quad (7.13)$$

其中积分常数 $\bar{c}_0$ 表示初始平均浓度,在给定的时间段 $\delta T$ 内,假定 $V_c$ 和 $Q$ 与时间无关,则

上式得:

$$\bar{c} = \frac{Q}{V_c} (1 - e^{-\frac{V_c}{\tau} \delta T}) + \bar{c}_0 e^{-\frac{V_c}{\tau} \delta T} \quad (7.14)$$

由式(7.14)就可计算出体积 $\tau$ 内、 $\delta T$ 时段的污染物平均浓度。

### 7.2.2 箱格预报模式

箱格模式是把城市空间看成一个或几个固定不动的箱体，研究箱体内空气污染物的平均浓度及其随时间的变化。箱格模式的出发点是假设箱体内污染物质守恒，污染物在箱体内均匀混合。设城市宽度为 $W$ 、长度为 $L$ 、混合层高度为 $H$ ，则箱体内污染物浓度的变化可表示为：

$$\tau d\bar{C} = C_{DI} + C_{DC} - C_{DG} - C_{DW} - C_{DD} \quad (7.15)$$

式中 $\tau = L \times W \times H$ 为箱体体积； $\bar{C}$ 为箱体内污染物的平均浓度； $C_{DI}$ 为箱体内排放的污染物浓度； $C_{DC}$ 为上风方向平流进入箱体内的污染物浓度； $C_{DG}$ 为箱体内平流出的污染物浓度； $C_{DW}$ 为从箱体上部扩散而流出的污染物浓度； $C_{DD}$ 为污染物干、湿沉降及其它损耗量。

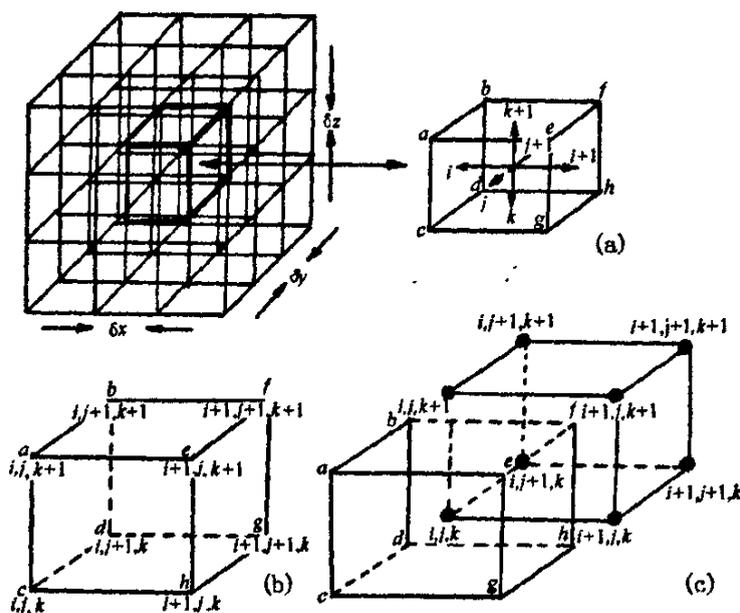


图 7.1 (a)箱格网络；(b)箱格风矢量坐标网络；(c)箱格浓度标量坐标网络

在箱格预报模式中，设中心位置在  $x = (i + \frac{1}{2})\delta X$ ， $y = (j + \frac{1}{2})\delta Y$ ， $z = (k + \frac{1}{2})\delta Z$ ， $i = 1, 2, \dots, M$ ； $j = 1, 2, \dots, N$ ； $k = 1, 2, \dots, L$ （在黑圆点坐标网中  $x = i\delta X$ ， $y = j\delta Y$ ， $z = k\delta Y$ ）的箱体  $abcd-efgh$  的体积  $\tau = \delta X \times \delta Y \times \delta Z$ ，它沿  $X$  方

向水平长度为  $\delta X$ ,  $Y$  方向水平宽度为  $\delta Y$ , 高为  $\delta Z$ , 见图 7.1(a), 设箱格风速矢量坐标网为图 7.1(b), 浓度标量坐标网为黑圆点网, 见图 7.1(c)。在  $t = n\delta T$  时体积内浓度平均值为  $C_{i,j,k}$ , 通过界面 abcd、efgh、aecg、bfdh、cdgh、abef 并与之垂直的平均风速分别为:

$$\begin{aligned}
 u_i &= \frac{1}{4}(u_{i,j,k} + u_{i,j+1,k} + u_{i,j,k+1} + u_{i,j+1,k+1}) \\
 u_{i+1} &= \frac{1}{4}(u_{i+1,j,k} + u_{i+1,j+1,k} + u_{i+1,j,k+1} + u_{i+1,j+1,k+1}) \\
 v_j &= \frac{1}{4}(v_{i,j,k} + v_{i+1,j,k} + v_{i,j,k+1} + v_{i+1,j,k+1}) \\
 v_{j+1} &= \frac{1}{4}(v_{i,j+1,k} + v_{i+1,j+1,k} + v_{i,j+1,k+1} + v_{i+1,j+1,k+1}) \\
 w_k &= \frac{1}{4}(w_{i,j,k} + w_{i,j+1,k} + w_{i+1,j,k} + w_{i+1,j+1,k}) \\
 w_{k+1} &= \frac{1}{4}(w_{i,j,k+1} + w_{i,j+1,k+1} + w_{i+1,j,k+1} + w_{i+1,j+1,k+1})
 \end{aligned} \tag{7.16}$$

其中,  $u_{i,j,k}$ ,  $v_{i,j,k}$ ,  $w_{i,j,k}$  为 c 点上风矢量  $\vec{V}_{i,j,k}$  的 3 个分量;  $u_{i,j+1,k}$ ,  $v_{i,j+1,k}$ ,  $w_{i,j+1,k}$  为 d 点上的风矢量  $\vec{V}_{i,j+1,k}$  的分量;  $u_{i,j,k+1}$ ,  $v_{i,j,k+1}$ ,  $w_{i,j,k+1}$  为 a 点上的风矢量  $\vec{V}_{i,j,k+1}$  的分量;  $u_{i,j+1,k+1}$ ,  $v_{i,j+1,k+1}$ ,  $w_{i,j+1,k+1}$  为 b 点上的风矢量  $\vec{V}_{i,j+1,k+1}$  的分量; 其他类推。在体积界面 abcd、efgh、aecg、bfdh、cdgh、abef 上虚拟湍流输送速度分别为  $u_{i,i}$ ,  $u_{i,i+1}$ ,  $v_{i,j}$ ,  $v_{i,j+1}$ ,  $w_{i,k}$ ,  $w_{i,k+1}$  输送的浓度分别为:

$$\begin{aligned}
 \Delta_{i,i-1}C &= C_{i,j,k} - C_{i-1,j,k} & \Delta_{i,i+1}C &= C_{i,j,k} - C_{i+1,j,k} \\
 \Delta_{i,j-1}C &= C_{i,j,k} - C_{i,j-1,k} & \Delta_{i,j+1}C &= C_{i,j,k} - C_{i,j+1,k} \\
 \Delta_{i,k-1}C &= C_{i,j,k} - C_{i,j,k-1} & \Delta_{i,k+1}C &= C_{i,j,k} - C_{i,j,k+1}
 \end{aligned}$$

另外, 在  $k \leq 0$  的平面上,  $w_k = w_{i,k} = 0$ , 干、湿沉降速度只有  $k$  方向分量, 其方向向下, 并假定干沉降在时间间隔  $\delta T$  内, 污染物仅降到临近的下一个箱体。根据公式 (7.12)  $V_c$  的平均值如下:

$$\begin{aligned}
 \bar{V}_{c,i,j,k,t=(n+1)\delta T} &= \frac{1}{\delta T} [(-u_{i,i}C_{i,j,k} + u_{i,i+1}C_{i+1,j,k} + u_{i,i}\Delta_{i,i-1}C + u_{i,i+1}\Delta_{i,i+1}C)\delta Y \times \delta Z \\
 &+ (-v_{i,j}C_{i,j,k} + v_{i,j+1}C_{i,j+1,k} + v_{i,j}\Delta_{i,j-1}C + v_{i,j+1}\Delta_{i,j+1}C)\delta X \times \delta Z \\
 &+ (-w_{i,k}C_{i,j,k} + w_{i,k+1}C_{i,j,k+1} + w_{i,k}\Delta_{i,k-1}C + w_{i,k+1}\Delta_{i,k+1}C \\
 &+ v_{d,i,j,k}\Delta_{i,k+1}C + v_{w,i,j,k}C_{i,j,k})\delta X \times \delta Y]_{t=n\delta T}
 \end{aligned} \tag{7.17}$$

式 (7.17) 仅考虑了两相邻体积间的浓度的扩散过程, 如果平均的时间和距离较长, 必需考虑湍流的能量, 应按式 (7.17) 计算  $V_c$  的平均值:

$$\begin{aligned}
\bar{V}_{c,i,j,k,t=(n+1)\delta T} = & \frac{1}{\bar{c}} [(-u_i c_i + u_{i+1} c_{i+1} + u_{i,t} \sum \alpha_{i,r} \Delta_{i,r} c) \delta Y \times \delta Z \\
& + (-v_j q + v_{j+1} q_{j+1} + v_{j,t} \sum \beta_{j,r} \Delta_{j,r} c) \delta X \times \delta Z \\
& + (-w_k c_k + w_{k+1} c_{k+1} + w_{k,t} \sum \gamma_{k,r} \Delta_{k,r} c \\
& + v_{d,i,j,k} c_{i,j,k} - v_{d,i,j,k} c_{i,j,k+1} + v_{w,i,j,k} c_{i,j,k}) \delta X \times \delta Y]_{t=n\delta T}
\end{aligned} \tag{7.18}$$

其中:

$$\Delta_{i,r} c = c_{i,j,k} - c_{r,j,k} \quad i'(\neq i) = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$\Delta_{j,r} c = c_{i,j,k} - c_{i,j',k} \quad j'(\neq j) = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$\Delta_{k,r} c = c_{i,j,k} - c_{i,j,k'} \quad k'(\neq k) = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$\sum_{i'=1}^n \alpha_{i,r} = 1 \quad \sum_{j'=1}^n \beta_{j,r} = 1 \quad \sum_{k'=1}^n \gamma_{k,r} = 1$$

箱格预报模式的计算流程, 由气象预报模式给出  $t = n\delta T$  时刻的风场、降水量分布 (计算湿沉降速度)、各种尺度的虚拟扩散速度场等初始场, 还要给出各箱体内部的源强及浓度值 (要注意的是, 本模式在短时间内对初始浓度依赖性较大, 在长时间后则对源强依赖性大), 通过式 (7.17) 和 (7.18) 求得各箱体的通风扩散稀释和干、湿沉降的总能力的平均值  $V_c$  (同时也给出污染物的干、湿沉降量) 后, 再按式 (7.14) 计算出在一个时间步长  $\delta T$  时刻的各箱体的浓度值, 该值也就是下一个时间步长开始时的浓度初值。这里的时间步长可以与气象模式中的步长一致, 也可远大于气象模式中的时间步长, 因为它们之间并无任何直接联系。  $\delta T$  选取得较小时模式对前期浓度依赖较强, 选取较大时, 模式对源强依赖大。

箱体可堆置于大气边界层, 这时箱体堆积总高度为边界层高度, 箱体侧边界面积的高度依赖于当地边界层高  $H$ , 则单个箱体高度为  $\delta Z = H/L$ ,  $L$  为垂直方向箱体个数。

### 7.2.3 CAPPS 的系统结构

CAPPS 系统由 MM5 中尺度气象模式和大气平流扩散格模式组成的。主要构成如图 7.2 所示, 气象模式分三部分, 一是资料预处理, 包括初始资料获取、格式转换、检误、客观分析和初值化等; 二是模式动力学预报部分, 由 MM5 改造而成; 三是模式计算结果的处理, 包括坐标转化, 箱格模式需要的  $\bar{V}$ ,  $\bar{v}_w$ ,  $\bar{v}_d$ ,  $\bar{V}_i$  的计算等。箱格模式的顶层为大气边界层顶, 水平分辨率由箱体底面积输入参数自动确定。模式系统所需的参数有: 模式网格中心点的经纬度; 所要预报的城市或监测点所代表区域的经纬度、面积、所在区的地理区号。地形特征值是由分辨率为  $10'$  的地形高度资料经客观分析到网络点上得到的。地表特征只分两

类：陆面和水面。初始时刻污染物浓度监测资料应为每日 08 时或 20 时监测的污染浓度值，也可用前一日污染物平均浓度值代替。CAPPS 模式系统每 3 小时输出一次所需要的城市或区域 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub> 的浓度值、API 指数和污染等级。

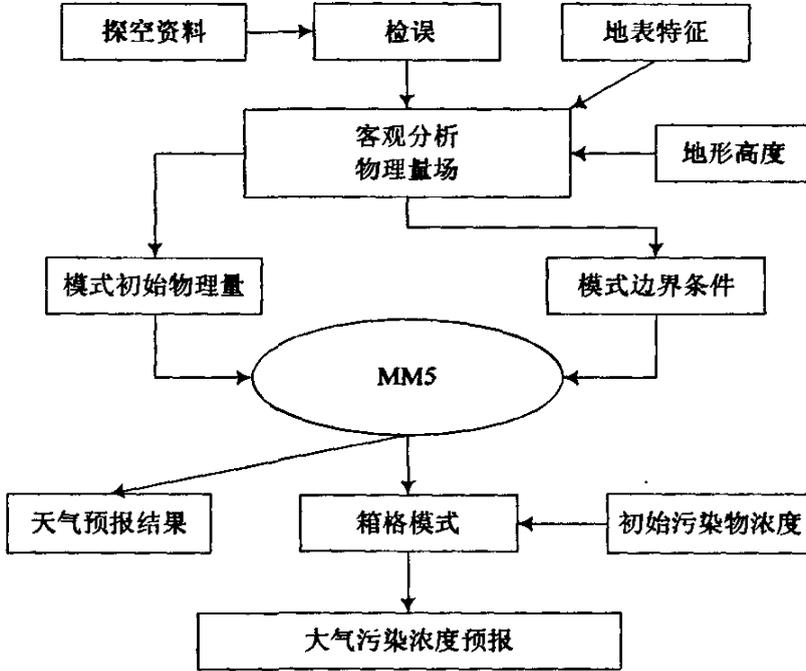


图 7.2 CAPPS 系统流程图

### 7.3 银川市空气主要污染物浓度的动力统计预测模型\*

参考尚可政的研究思路<sup>[78]</sup>，并在上述数值预报研究的基础上，进一步分析式(7.17)和(7.18)，发现大气通风扩散稀释和干湿沉降的总能力  $V_c$  可表示为：

$$V_c = f_1(u) \times (W \times H) + f_2(v) \times (L \times H) + f_3(v_i + v_d + v_w) \times (L \times W) \quad (7.19)$$

式中  $u$ 、 $v$  为矢量风  $\vec{V}$  的  $u$ 、 $v$  方向的分量； $L$ 、 $W$ 、 $H$  分别表示城市箱体的长、宽、高。

污染物湍流输送速度  $v_i$  和干沉降速度  $v_d$  对大气稳定度最为敏感，而稳定度直接与气温、风速及云量等气象要素有关<sup>[77]</sup>；湿沉降速度  $v_w$  表征了雨水对空气污染物的“清洗”作用，可用降水量的函数来表示；另外，污染物的化学反应与一定的气象条件有关，大气环境中光、温、水汽等对污染物的化学反应起着一定加速或抑制作用。综上所述，可将式(7.19)右方各项看成  $u$ 、 $v$  风速、气温、总云量、低云量、降水量及相对湿度的综合函数，可记作：

$$V_c = F(u, v, T, NL, NN, R, U) \quad (7.20)$$

\* 该部分成果已在《干旱区地理》2007年第1期发表

式中  $F$  为各种气象条件的综合函数;  $T$  表示气温;  $NL$ 、 $NN$  分别代表总云量和低云量;  $R$  为降水量;  $U$  代表相对湿度。

表 7.3 银川市 6~9 月大气主要污染物浓度 24h 变率预报方程回归系数

| 月份 | 污染物              | $a_0$  | $a_1$   | $a_2$  | $a_3$  | $a_4$  | $a_5$  | $a_6$  | $a_7$  | $a_8$  |
|----|------------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1  | SO <sub>2</sub>  | 0.244  | -2.182  | -0.092 | 0.010  | -0.023 | 0.005  | -0.059 | 0.141  | 0.000  |
|    | NO <sub>2</sub>  | 0.107  | -2.067  | -0.042 | 0.003  | -0.013 | 0.004  | 0.001  | 0.118  | -0.001 |
|    | PM <sub>10</sub> | 0.884  | -3.823  | 0.004  | -0.024 | 0.013  | -0.015 | -0.044 | 0.311  | -0.002 |
| 2  | SO <sub>2</sub>  | 0.720  | -3.353  | -0.078 | 0.064  | -0.022 | -0.010 | -0.150 | 0.430  | -0.005 |
|    | NO <sub>2</sub>  | 0.380  | -3.724  | -0.008 | 0.042  | -0.002 | -0.008 | 0.084  | 0.221  | -0.002 |
|    | PM <sub>10</sub> | 1.065  | -2.485  | 0.141  | 0.062  | 0.019  | -0.069 | 0.137  | -0.391 | -0.006 |
| 3  | SO <sub>2</sub>  | 0.392  | -2.896  | -0.020 | 0.017  | -0.021 | 0.014  | -0.102 | 0.009  | -0.001 |
|    | NO <sub>2</sub>  | 0.491  | -5.591  | 0.017  | 0.058  | -0.006 | 0.005  | -0.008 | 0.053  | -0.004 |
|    | PM <sub>10</sub> | 0.998  | -2.612  | -0.017 | -0.030 | -0.019 | -0.030 | -0.042 | 0.027  | -0.005 |
| 4  | SO <sub>2</sub>  | 0.421  | -7.691  | -0.016 | 0.008  | -0.012 | 0.003  | 0.003  | -0.020 | 0.000  |
|    | NO <sub>2</sub>  | 0.479  | -7.008  | -0.033 | 0.017  | -0.004 | -0.005 | 0.042  | 0.000  | -0.002 |
|    | PM <sub>10</sub> | 0.381  | -1.937  | -0.009 | -0.065 | -0.011 | -0.005 | 0.022  | 0.093  | 0.007  |
| 5  | SO <sub>2</sub>  | 0.309  | -12.857 | 0.007  | -0.015 | -0.004 | 0.021  | -0.012 | -0.017 | 0.002  |
|    | NO <sub>2</sub>  | 3.176  | -49.157 | 0.121  | -0.041 | -0.051 | 0.115  | -0.283 | -0.010 | -0.010 |
|    | PM <sub>10</sub> | 1.375  | -5.433  | -0.005 | -0.043 | -0.017 | -0.015 | 0.052  | 0.008  | -0.011 |
| 6  | SO <sub>2</sub>  | 0.238  | -34.824 | 0.048  | -0.015 | 0.023  | 0.024  | 0.001  | 0.001  | 0.000  |
|    | NO <sub>2</sub>  | 1.168  | -9.143  | -0.009 | -0.019 | -0.028 | 0.008  | -0.007 | 0.008  | -0.005 |
|    | PM <sub>10</sub> | 0.168  | -2.323  | -0.010 | -0.079 | -0.005 | 0.001  | 0.011  | 0.012  | 0.003  |
| 7  | SO <sub>2</sub>  | 0.261  | -4.972  | 0.017  | -0.010 | -0.005 | -0.007 | 0.041  | 0.044  | -0.001 |
|    | NO <sub>2</sub>  | 3.795  | -30.063 | 0.007  | -0.089 | -0.104 | -0.021 | -0.003 | -0.013 | -0.004 |
|    | PM <sub>10</sub> | 0.067  | -4.076  | -0.001 | -0.006 | 0.014  | -0.025 | 0.018  | 0.050  | 0.001  |
| 8  | SO <sub>2</sub>  | 0.151  | -7.930  | 0.014  | -0.023 | -0.005 | -0.001 | -0.019 | 0.001  | 0.003  |
|    | NO <sub>2</sub>  | -0.479 | -8.439  | 0.009  | -0.022 | 0.016  | 0.016  | -0.021 | 0.012  | 0.005  |
|    | PM <sub>10</sub> | 0.665  | -7.450  | 0.064  | -0.010 | 0.008  | -0.021 | 0.032  | 0.009  | -0.003 |
| 9  | SO <sub>2</sub>  | 1.110  | -19.418 | 0.020  | -0.043 | -0.027 | 0.008  | 0.012  | 0.002  | -0.003 |
|    | NO <sub>2</sub>  | 1.022  | -9.820  | -0.009 | 0.002  | -0.011 | 0.001  | 0.025  | 0.007  | -0.007 |
|    | PM <sub>10</sub> | 1.321  | -10.426 | 0.035  | -0.029 | -0.014 | -0.004 | -0.014 | 0.009  | -0.003 |
| 10 | SO <sub>2</sub>  | 0.643  | -5.134  | -0.033 | -0.002 | -0.027 | 0.001  | 0.036  | 0.008  | -0.002 |
|    | NO <sub>2</sub>  | 0.690  | -6.182  | -0.019 | 0.029  | -0.011 | -0.003 | 0.057  | 0.007  | -0.005 |
|    | PM <sub>10</sub> | 0.763  | -5.966  | 0.003  | 0.010  | -0.008 | -0.032 | -0.002 | 0.055  | 0.002  |
| 11 | SO <sub>2</sub>  | 0.319  | -1.850  | 0.072  | 0.035  | -0.001 | -0.006 | 0.031  | -0.048 | 0.000  |
|    | NO <sub>2</sub>  | 0.652  | -6.253  | -0.009 | 0.034  | -0.009 | 0.009  | 0.060  | 0.018  | -0.005 |
|    | PM <sub>10</sub> | 0.990  | -3.828  | -0.028 | 0.008  | -0.032 | -0.015 | 0.016  | 0.019  | -0.006 |
| 12 | SO <sub>2</sub>  | 0.884  | -4.088  | -0.071 | 0.090  | -0.019 | -0.027 | 0.555  | 0.116  | -0.007 |
|    | NO <sub>2</sub>  | 0.633  | -4.694  | -0.036 | -0.001 | -0.014 | 0.000  | 0.087  | -0.020 | -0.007 |
|    | PM <sub>10</sub> | 0.465  | -3.530  | 0.020  | 0.045  | -0.012 | -0.009 | 0.076  | -0.270 | 0.000  |

参考尚可政等人<sup>[78]</sup>的研究方法, 将式(7.11)左端微分项用差分代替, 并采用前差格式,

时间步长取  $\Delta t$  为 1 天, 则污染物浓度变化率  $Y_k = \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{\bar{C}_{k+1} - \bar{C}_k}{\bar{C}_k}$ ,  $k$  为天数序列, 并假定

污染排放量  $Q$  在一个月的时间尺度内是一个常量, 因此根据式 (7.11) 及式 (7.20), 并采用线性模型拟合气象条件综合函数, 则有:

$$Y_k = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 \cdots + a_8x_8 \quad (7.21)$$

式中:  $a_0 \sim a_8$ : 为拟合系数;  $x_1$ : 为污染物浓度;  $x_2$ 、 $x_3$ : 分别为风速的  $u$ 、 $v$  分量;  $x_4$ : 为气温;  $x_5$ 、 $x_6$ : 为总云量和低云量;  $x_7$ : 为降水量;  $x_8$ : 为相对湿度。

利用银川市 2001 ~ 2004 年空气主要污染物日均浓度监测值, 计算出各月逐日浓度变率  $Y_k$ , 与  $x_0 \sim x_8$  进行多元回归拟合, 拟合系数表 7.3。因此, 根据第  $k$  天的气象要素和污染物浓度, 由式 (7.21) 及表 7.3 预报出次日污染物浓度变化率后, 便可得到第  $k+1$  天的污染物浓度:

$$\bar{C}_{k+1} = (1 + Y_k) \times \bar{C}_k \quad (7.22)$$

## 7.4 银川市空气污染多元线性回归统计预报模式

统计预报方法是以数理统计为基础, 以空气污染浓度资料及同期的气象观测资料为依据, 建立空气污染浓度统计预报模型。用统计学中的两种方法, 一是在缺少气象资料的前提下, 单纯利用环境空气监测资料, 建立空气污染的时间序列分析预报模型; 另外一种方法是利用气象资料, 建立空气污染物浓度与气象因子的统计预报模式, 即多元线性回归分析的预报模型。本节通过对 2001~2004 年银川市空气污染物浓度、污染气象条件、空气污染状况和它们之间的关系进行综合分析研究, 力求找寻其相关的规律性, 最终建立银川市空气污染多元线性统计预报模型。

### 7.4.1 多元线性回归分析模型原理

在多元回归分析 (multiple regression analysis) 中, 最为简单、常用并且具有基础性质的是多元线性回归分析 (multiple linear regression analysis), 许多非线性回归 (non-linear regression) 和多项式回归 (polynomial regression) 都可以化为多元线性回归来解决, 因而多元线性回归分析有着广泛的应用。多元线性回归分析的基本任务包括: 根据依变量与多个自变量的实际观测值建立依变量对多个自变量的多元线性回归方程; 检验、分析各个自变量对依变量的综合线性影响的显著性; 检验、分析各个自变量对依变量的单纯线性影响的显著性, 选择仅对因变量有显著线性影响的自变量, 建立最优多元线性回归方程; 评定各个自变量对因变量影响的相对重要性以及测定最优多元线性回归方程的偏离度等。设因变量  $y$  与自变量  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $\cdots$ 、 $x_m$  共有  $n$  组实际观测数据:

假定依变量  $y$  与自变量  $x_1, x_2, \dots, x_m$  间存在线性关系, 其数学模型为:

$$y_j = \beta_0 + \beta_1 x_{1j} + \beta_2 x_{2j} + \dots + \beta_m x_{mj} + \varepsilon_j \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (7.23)$$

式中,  $x_1, x_2, \dots, x_m$  为可以观测的一般变量 (或为可以观测的随机变量);  $y$  为可以观测的随机变量, 随  $x_1, x_2, \dots, x_m$  而变, 受试验误差影响;  $\varepsilon_j$  为相互独立且都服从  $N(0, \sigma^2)$

的随机变量。我们可以根据实际观测值对  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$  以及方差  $\sigma^2$  做出估计。设  $y$  对  $x_1, x_2, \dots, x_m$  的  $m$  元线性回归方程为:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_m x_m \quad (7.24)$$

其中的  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_m$  为  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$  的最小二乘估计值。即  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_m$  应使实际观测值  $y$  与回归估计值  $\hat{y}$  的偏差平方和最小。

#### 7.4.2 预报因子的选取

表 7.4 主要污染物浓度与气压关系表 浓度单位:  $\text{mg}/\text{m}^3$

| 序号 | 日平均气压     | PM <sub>10</sub> | SO <sub>2</sub> | NO <sub>2</sub> |
|----|-----------|------------------|-----------------|-----------------|
| 1  | <880      | 0.071            | 0.021           | 0.022           |
| 2  | 880 ~ 881 | 0.179            | 0.028           | 0.023           |
| 3  | 882 ~ 883 | 0.081            | 0.035           | 0.019           |
| 4  | 884 ~ 885 | 0.101            | 0.039           | 0.021           |
| 5  | 886 ~ 887 | 0.131            | 0.050           | 0.025           |
| 6  | 888 ~ 889 | 0.189            | 0.078           | 0.029           |
| 7  | 890 ~ 891 | 0.161            | 0.147           | 0.036           |
| 8  | 892 ~ 893 | 0.153            | 0.137           | 0.035           |
| 9  | 894 ~ 895 | 0.190            | 0.158           | 0.037           |
| 10 | 896 ~ 897 | 0.131            | 0.138           | 0.037           |
| 11 | 898 ~ 899 | 0.134            | 0.153           | 0.037           |
| 12 | >900      | 0.123            | 0.151           | 0.036           |

污染物浓度的分布与气象要素关系密切, 而气象要素本身随时都在变化之中, 彼此又互相制约, 各气象要素的不同组合, 出现不同的气象特征, 对大气污染物的扩散产生不同的影响。故本文特将能综合反映各种天气类型变化的特征要素, 气压、气温、湿度、云量、风速、降水与主要污染物浓度进行相关统计分析, 同时将反映西北特点的风沙天气一并纳入预报因子范围, 以期从表征不同天气征候的要素变化, 预测银川市污染物浓度变化。

## 1. 污染物浓度与气压的关系

气压可直接表征地面受高压或低压控制，具体反映为地面受冷、暖空气控制的程度，其变化大小预示天气过程的强弱。表 7.4 为统计年内银川市本站日平均气压与主要污染物 PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 的浓度关系，为统计方便将 880 至 900hpa 范围以 2hpa 量值划分，将小于 880hpa 与大于 900hpa 各分一档，共分 12 档。其统计结果表明，随着本站气压的变化 PM<sub>10</sub> 浓度变化规律不明显，基本呈无规律性变化；而 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 浓度随着本站气压具有一定规律性变化，即随着气压升高其浓度也逐渐增大，当气压大于 892hpa 时，空气中 SO<sub>2</sub> 及 NO<sub>2</sub> 含量趋于稳定。

## 2. 污染物浓度与气温的关系

表 7.5 主要污染物浓度与气温关系表 浓度单位：mg/m<sup>3</sup>

| 序号 | 平均气温        | PM <sub>10</sub> | SO <sub>2</sub> | NO <sub>2</sub> |
|----|-------------|------------------|-----------------|-----------------|
| 1  | ≤0          | 0.170            | 0.206           | 0.045           |
| 2  | 0.1 ~ 5.0   | 0.208            | 0.154           | 0.037           |
| 3  | 5.1 ~ 10.0  | 0.158            | 0.086           | 0.028           |
| 4  | 10.1 ~ 15.0 | 0.215            | 0.051           | 0.025           |
| 5  | 15.1 ~ 20.0 | 0.107            | 0.030           | 0.022           |
| 6  | 20.1 ~ 25.0 | 0.072            | 0.030           | 0.019           |
| 7  | >25         | 0.061            | 0.020           | 0.019           |

气温的高低直接反映四季的天气变化，当冬季日平均气温小于 0℃ 时，从表 7.5 中可看出三种污染物浓度均较高，当夏季日平均气温大于 25℃ 时，三种污染物的浓度均达最低值。

表 7.6 主要污染物浓度与变温关系表 浓度单位：mg/m<sup>3</sup>

| 项目  | PM <sub>10</sub> | SO <sub>2</sub> | NO <sub>2</sub> |
|-----|------------------|-----------------|-----------------|
| 平均值 | 0.141            | 0.098           | 0.030           |
| 正变温 | 0.139            | 0.099           | 0.030           |
| 负变温 | 0.289            | 0.045           | 0.020           |

其中 SO<sub>2</sub> 与 NO<sub>2</sub> 的浓度明显随环境温度的降低而升高，随环境温度的升高而降低，即表示冬季采暖燃煤的使用，直接导致这两种污染物浓度的增加，夏季日平均温度稳定超过 20℃，这两种污染物浓度降为最低；同样 PM<sub>10</sub> 浓度在小于 0℃ 时，冬季浓度为相对较大值，与实测监测结果相一致，在 5 到 15℃ 的春季，其浓度出现最大值，夏季 PM<sub>10</sub> 浓度随温度稳定大于 20℃ 逐渐降为最低。

为反映天气形式的变化,特选取 14 时与 08 时的 6 小时温差,统计说明其变化关系(见表 7.6),从表 7.6 可明显看出,正变温时主要污染物浓度与平均值差异不大。出现负变温时,PM<sub>10</sub> 浓度增加明显,即有剧烈天气过程出现时,如锋面过境出现大风扬沙天气时,PM<sub>10</sub> 浓度随之增加,与此同时 SO<sub>2</sub> 与 NO<sub>2</sub> 浓度减少,正反映风对污染物的稀释扩散作用。

### 3. 污染物浓度与相对湿度的关系

表 7.7 主要污染物浓度与相对湿度关系表 浓度单位: mg/m<sup>3</sup>

| 序号 | 相对湿度    | PM <sub>10</sub> | SO <sub>2</sub> | NO <sub>2</sub> |
|----|---------|------------------|-----------------|-----------------|
| 1  | ≤30     | 0.212            | 0.116           | 0.036           |
| 2  | 31 ~ 40 | 0.182            | 0.113           | 0.036           |
| 3  | 41 ~ 50 | 0.145            | 0.123           | 0.034           |
| 4  | 51 ~ 60 | 0.113            | 0.084           | 0.027           |
| 5  | 61 ~ 70 | 0.128            | 0.096           | 0.027           |
| 6  | >70     | 0.087            | 0.062           | 0.020           |

将统计年内,逐日相对湿度以 10% 为单位进行等级划分,共分为 6 级(见表 7.7),从表中可明显看出,随相对湿度的逐步增大三种污染物在逐渐减小,这正说明水汽的作用,一方面降水可大大降少与生产、交通、建筑等与人为活动相关的扬尘,另一方面,作为湿清除过程的降水可促使大气中的微量气体(SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>等)产生化学转化而“消失”<sup>[70]</sup>。

### 4. 污染物浓度与云量的关系

表 7.8 主要污染物浓度与云量关系表 浓度单位: mg/m<sup>3</sup>

| 序号 | 总云量        | PM <sub>10</sub> | SO <sub>2</sub> | NO <sub>2</sub> | 低云量        | PM <sub>10</sub> | SO <sub>2</sub> | NO <sub>2</sub> |
|----|------------|------------------|-----------------|-----------------|------------|------------------|-----------------|-----------------|
| 1  | 0.0 ~ 1.9  | 0.150            | 0.139           | 0.037           | 0.0 ~ 1.9  | 0.151            | 0.111           | 0.032           |
| 2  | 2.0 ~ 8.0  | 0.142            | 0.092           | 0.029           | 2.0 ~ 8.0  | 0.092            | 0.030           | 0.018           |
| 3  | 8.1 ~ 10.0 | 0.127            | 0.055           | 0.022           | 8.1 ~ 10.0 | 0.059            | 0.028           | 0.011           |

由表 7.8 可看出,空气中各污染物浓度与总云量和低云量呈较好的关系,即云量越多,污染物浓度越低。由于云是伴随天气过程出现的,当地面或高空有天气系统出现时,即伴随天空中出现大量云系,如冷锋前后出现的大量云系。由于云是大气中水汽凝结物的产物,云量的增加,一方面可削弱太阳的辐射强度,抑制气溶胶粒子的光化学反应机制<sup>[73]</sup>,另一方面水汽可与大气中的微量气体发生化学反应而被“消除”。

### 5. 污染物浓度与风速的关系

风是空气相对于地面的水平运动,它有方向和大小,排入到大气中的污染物在风的作用下,会被输送到其它地区,风速愈大,单位时间内污染物被输送的距离愈远,混入的空气量

愈多，污染物浓度愈低，所以风不但对污染物进行水平搬运，而且有稀释冲淡作用。表 7.9 即反映出风速在 1 到 2 级内，随风速等级的增大，污染物浓度在随之减少，在 2 到 4 级  $PM_{10}$  浓度随风速的增大而增加。进一步统计出日平均风速等于 3m/s 为风沙日起沙的阈值风速，当日平均风速小于 3m/s 时，污染浓度随风速的增大而减小；当日平均风速大于 3m/s 时，大风吹起地面扬尘，导致空气中  $PM_{10}$  浓度剧增，此结果与沙尘暴起沙的瞬时阈值风速的结论相一致<sup>[75]</sup>。

表 7.9 污染物浓度与风速关系表 浓度单位： $mg/m^3$

| 序号 | 风力  | 风速 (m/s)  | $PM_{10}$ | $SO_2$ | $NO_2$ |
|----|-----|-----------|-----------|--------|--------|
| 1  | 1 级 | 0.3 ~ 1.5 | 0.154     | 0.147  | 0.037  |
| 2  | 2 级 | 1.6 ~ 3.3 | 0.125     | 0.086  | 0.028  |
| 3  | 3 级 | 3.4 ~ 5.4 | 0.170     | 0.084  | 0.029  |
| 4  | 4 级 | 5.5 ~ 7.9 | 0.266     | 0.123  | 0.028  |

#### 7.4.3 多元线性回归预报方程的建立

在对气象要素气压、气温、湿度、降水、风速等因子的统计分析中，进一步对实测污染物浓度进行了相关普查，结合第六章的研究内容，筛选出统计检验较为显著的气象因子有：6 小时变温 (14 时与 08 时气温差)、日平均气温、日平均风速、日降水量、日平均相对湿度。将这些气象要素及实测各污染物浓度值作为回归因子，采用多元线性回归方法建立预测银川市未来 24 小时主要污染物浓度的统计预报方程 (见表 7.10)。

表 7.10 各项的意义：

R 为复相关系数；Y1、Y2、Y3 分别代表  $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$  浓度的 24 小时预报方程；X1 为起报日的污染物浓度值；X2 为预报日的平均气温；X3 为预报日的 6 小时变温；X4 为预报日的平均风速；X5 为预报日的降水量；X6 为预报日的平均相对湿度。

表 7.10 银川市各月污染浓度 24 小时预报方程

| 月份 | 回归方程   | 样本数 | R    |
|----|--|-----|------|
| 1  | $Y1= 0.056+0.247X1+0.003X2+0.004X3-0.002X4-0.022X5+0.001X6$  | 122 | 0.65 |
|    | $Y2= 0.092+0.564X1-0.002X2+0.000X3-0.011X4-0.056X5+0.000X6$  |     | 0.67 |
|    | $Y3= 0.011+0.808X1+0.000X2+0.001X3-0.001X4-0.001X5+0.000X6$  |     | 0.86 |
| 2  | $Y1=-0.040+0.381X1+0.002X2+0.005X3+0.009 X4-0.107X5+0.001X6$ | 111 | 0.67 |
|    | $Y2= 0.046+0.643X1-0.001X2+0.000X3-0.003X4-0.147X5+0.000X6$  |     | 0.68 |
|    | $Y3= 0.000+0.738X1+0.000X2+0.001X3+0.001X4-0.037X5+0.000X6$  |     | 0.75 |
| 3  | $Y1= 0.038+0.326X1+0.003X2+0.004X3+0.006X4+0.016X5+0.000X6$  | 122 | 0.50 |
|    | $Y2= 0.055+0.696X1-0.002X2+0.000X3-0.003X4+0.000X5+0.000X6$  |     | 0.78 |
|    | $Y3= 0.042+0.708X1+0.000X2+0.000X3-0.004X4+0.000X5+0.000X6$  |     | 0.75 |
| 4  | $Y1=-0.078+0.512X1+0.002X2+0.002X3+0.018X4-0.012X5+0.001X6$  | 118 | 0.55 |
|    | $Y2= 0.028+0.646X1+0.000X2+0.000X3-0.002X4+0.000X5+0.005X6$  |     | 0.66 |
|    | $Y3= 0.028+0.713X1+0.000X2+0.000X3-0.002X4+0.001X5+0.000X6$  |     | 0.81 |
| 5  | $Y1=-0.038+0.485X1+0.001X2+0.003X3+0.009X4-0.001X5+0.000X6$  | 122 | 0.61 |
|    | $Y2=-0.005+0.661X1+0.000X2+0.001X3+0.000X4+0.000X5+0.000X6$  |     | 0.72 |
|    | $Y3= 0.065+0.431X1-0.001X2+0.000X3-0.002X4+0.000X5+0.000X6$  |     | 0.66 |
| 6  | $Y1=-0.013+0.440X1+0.000X2+0.003X3+0.010X4-0.001X5+0.000X6$  | 118 | 0.50 |
|    | $Y2= 0.002+0.620X1+0.000X2+0.001X3+0.001X4+0.000X5+0.000X6$  |     | 0.67 |
|    | $Y3= 0.025+0.672X1-0.001X2+0.001X3-0.001X4+0.000X5+0.000X6$  |     | 0.74 |
| 7  | $Y1=-0.061+0.503X1+0.004X2+0.001X3+0.000X4+0.000X5+0.000X6$  | 122 | 0.67 |
|    | $Y2= 0.008+0.811X1+0.000X2+0.000X3-0.002X4+0.000X5+0.000X6$  |     | 0.83 |
|    | $Y3= 0.010+0.675X1+0.000X2+0.000X3+0.000X4+0.000X5+0.000X6$  |     | 0.69 |
| 8  | $Y1= 0.119+0.250X1+0.001X2+0.000X3-0.009X4+0.001X5-0.001X6$  | 122 | 0.53 |
|    | $Y2= 0.013+0.705X1+0.000X2+0.000X3-0.001X4+0.000X5+0.000X6$  |     | 0.79 |
|    | $Y3= 0.036+0.741X1-0.001X2+0.000X3+0.001X4+0.000X5+0.000X6$  |     | 0.77 |
| 9  | $Y1= 0.050+0.053X1+0.001X2+0.002X3-0.001X4-0.001X5+0.000X6$  | 118 | 0.69 |
|    | $Y2= 0.018+0.471X1+0.000X2+0.000X3+0.000X4+0.000X5+0.000X6$  |     | 0.71 |
|    | $Y3= 0.025+0.660X1+0.000X2+0.000X3-0.003X4+0.000X5+0.000X6$  |     | 0.71 |
| 10 | $Y1= 0.024+0.411X1+0.001X2+0.002X3-0.007X4-0.001X5+0.000X6$  | 120 | 0.62 |
|    | $Y2= 0.034+0.521X1-0.001X2+0.000X3+0.000X4-0.001X5+0.000X6$  |     | 0.72 |
|    | $Y3= 0.015+0.730X1+0.000X2+0.000X3-0.002X4-0.001X5+0.000X6$  |     | 0.79 |
| 11 | $Y1= 0.006+0.375X1-0.001X2+0.004X3-0.007X4-0.001X5+0.001X6$  | 118 | 0.67 |
|    | $Y2= 0.158+0.073X1+0.001X2-0.001X3-0.012X4-0.008X5+0.000X6$  |     | 0.65 |
|    | $Y3= 0.010+0.654X1+0.000X2+0.000X3-0.002X4-0.001X5+0.000X6$  |     | 0.69 |
| 12 | $Y1= 0.015+0.430X1-0.001X2+0.003X3-0.012X4+0.003X5+0.001X6$  | 122 | 0.74 |
|    | $Y2= 0.056+0.377X1-0.002X2+0.001X3-0.012X4+0.007X5+0.000X6$  |     | 0.65 |
|    | $Y3= 0.029+0.733X1-0.001X2+0.001X3-0.005X4+0.005X5+0.000X6$  |     | 0.87 |

## 7.5 空气污染预报效果检验

### 7.5.1 检验方法说明

1. 选取 2005 年逐日污染物监测值及预测资料来分析各种预报方法的预报效果，样本共计 365 个；

2. 因空气污染预报以污染指数和污染等级方式对外发布的，故本文在预报检验中，均将 PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 的浓度监测值和预测值转化为 API 指数形式；

3. 污染物预报的相对误差：

$$\text{相对误差} = \frac{|\text{污染物指数实况值} - \text{污染物指数预报值}|}{\text{污染物指数实况值}} \times 100\%$$

4. 污染物级别预报准确率：

$$\text{预报准确率} = \frac{\text{污染物级别预报正确的天数}}{\text{有效预报的总天数}} \times 100\%$$

5. 空报率：

$$\text{空报率} = \frac{\text{污染物级别预报偏高的天数}}{\text{有效预报的总天数}} \times 100\%$$

6. 漏报率：

$$\text{漏报率} = \frac{\text{污染物级别预报偏低的天数}}{\text{有效预报的总天数}} \times 100\%$$

### 7.5.2 数值预报效果检验

图 7.4~7.6 分别给出了银川市 2005 年逐日空气污染数值预报、动力统计及多元线性回归方法的预测结果与实况值的对比分析图。由此可见，三种预报模式的预报情况与实际都比较接近，预测值与实况值的位相变化一致，各种预测模式均能较好地反映银川市空气污染的变化趋势。

三种预测模式的效果检验情况如表 7.11 所示。由表可知：

数值预报模式中，PM<sub>10</sub> 实况值与预测值的相关系数为 0.34，SO<sub>2</sub> 的相关系数为 0.88，NO<sub>2</sub> 的相关系数为 0.62，均超过了置信度 0.01 的检验；全年 PM<sub>10</sub> 的平均相对误差为 26%，SO<sub>2</sub> 的平均相对误差为 31%，NO<sub>2</sub> 的平均相对误差为 30%；PM<sub>10</sub> 等级预报准确率为 71%，SO<sub>2</sub> 等级预报准确率为 84%，NO<sub>2</sub> 级别预报准确率为 88%；PM<sub>10</sub> 空报率为 10%，SO<sub>2</sub> 空报率为 12%，NO<sub>2</sub> 空报率为 3%；PM<sub>10</sub> 漏报率为 19%，SO<sub>2</sub> 漏报率为 4%，NO<sub>2</sub> 漏报率为 9%。

动力统计模式中，PM<sub>10</sub> 的实况值与预测值的相关系数为 0.42，SO<sub>2</sub> 的相关系数为 0.92，NO<sub>2</sub> 的相关系数为 0.72，均超过了置信度 0.01 的检验；全年 PM<sub>10</sub> 的平均相对误差为 24%，SO<sub>2</sub> 的平均相对误差为 20%，NO<sub>2</sub> 的平均相对误差为 26%；PM<sub>10</sub> 等级预报准确率为 79%，SO<sub>2</sub>

等级预报准确率为 87%，NO<sub>2</sub> 级别预报准确率为 92%；PM<sub>10</sub> 空报率为 12%，SO<sub>2</sub> 空报率为 6%，NO<sub>2</sub> 空报率为 2%；PM<sub>10</sub> 漏报率为 9%，SO<sub>2</sub> 漏报率为 7%，NO<sub>2</sub> 漏报率为 6%。

多元线性回归模式中，PM<sub>10</sub> 的实况值与预测值的相关系数为 0.59，SO<sub>2</sub> 的相关系数为 0.72，NO<sub>2</sub> 的相关系数为 0.60，均超过了置信度 0.01 的检验；全年 PM<sub>10</sub> 的平均相对误差为 21%，SO<sub>2</sub> 的平均相对误差为 35%，NO<sub>2</sub> 的平均相对误差为 34%；PM<sub>10</sub> 等级预报准确率为 76%，SO<sub>2</sub> 等级预报准确率为 81%，NO<sub>2</sub> 级别预报准确率为 88%；PM<sub>10</sub> 空报率为 15%，SO<sub>2</sub> 空报率为 13%，NO<sub>2</sub> 空报率为 4%；PM<sub>10</sub> 漏报率为 8%，SO<sub>2</sub> 漏报率为 7%，NO<sub>2</sub> 漏报率为 8%。

表 7.11 银川市空气污染预报模式效果检验表

| 预测模式 | 污染物  | 样本数 | 相关系数 | 平均相对误差<br>(%) | 预报准确率<br>(%) | 空报率<br>(%) | 漏报率<br>(%) |
|------|------|-----|------|---------------|--------------|------------|------------|
| 数值预报 | PM10 | 365 | 0.34 | 26            | 71           | 10         | 19         |
|      | SO2  |     | 0.88 | 31            | 84           | 12         | 4          |
|      | NO2  |     | 0.62 | 30            | 88           | 3          | 9          |
| 动力统计 | PM10 | 365 | 0.42 | 24            | 79           | 12         | 9          |
|      | SO2  |     | 0.92 | 20            | 87           | 6          | 7          |
|      | NO2  |     | 0.72 | 26            | 92           | 2          | 6          |
| 多元回归 | PM10 | 365 | 0.59 | 21            | 76           | 15         | 8          |
|      | SO2  |     | 0.72 | 35            | 81           | 13         | 7          |
|      | NO2  |     | 0.60 | 34            | 88           | 4          | 8          |

由此可见，动力统计模式在银川市空气污染中预报预报效果最为显著，弥补了数值预报和纯数理统计预报模式的不足。CAPPS 数值模式与多元线性回归模式各有优缺点，对于气体污染物（SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>）数值模式的相对误差小于多元回归模式，相应的级别预报准确率也较高于多元回归模式；而颗粒污染物（PM<sub>10</sub>），数值模式的预报能力较弱于多元回归模式。

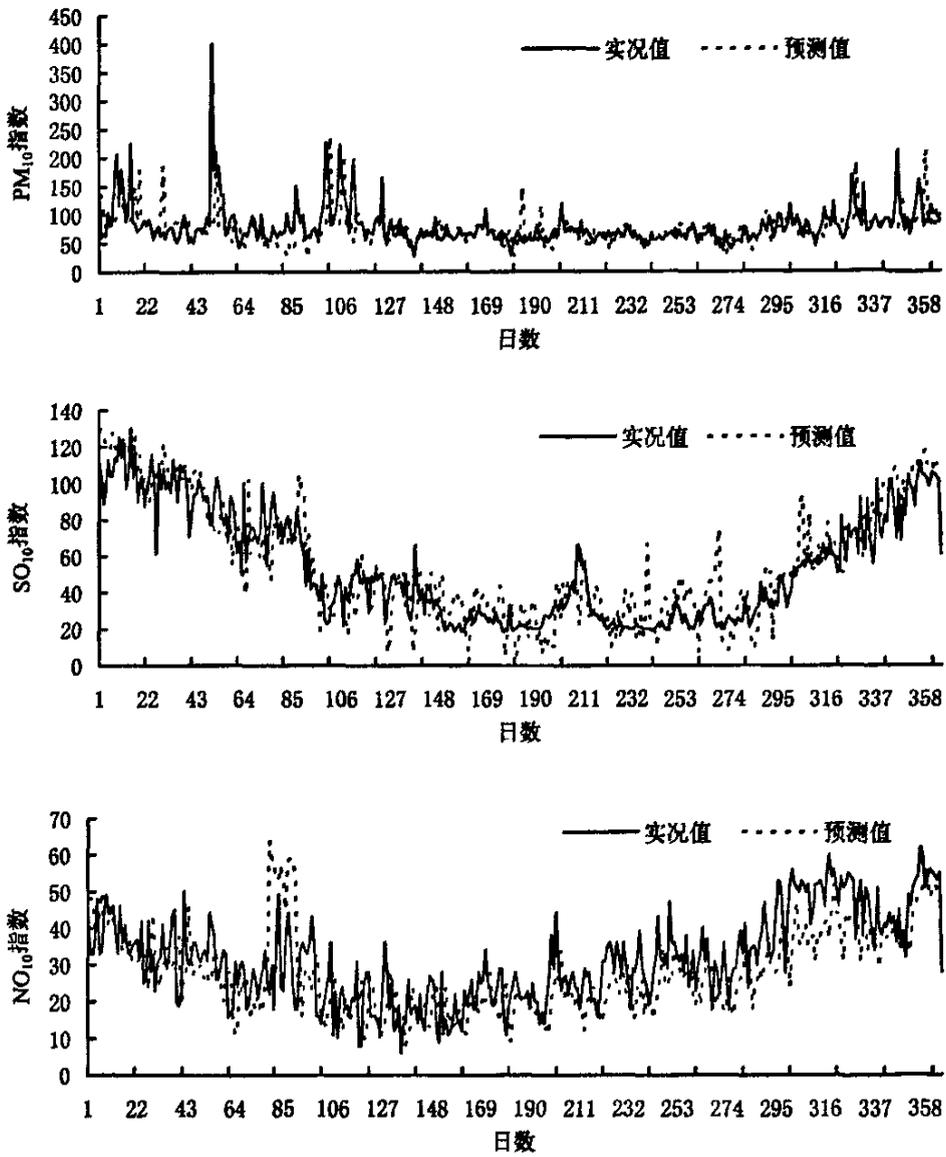


图 7.4 2005 年银川市空气污染数值预报实况值与预测值时间序列图

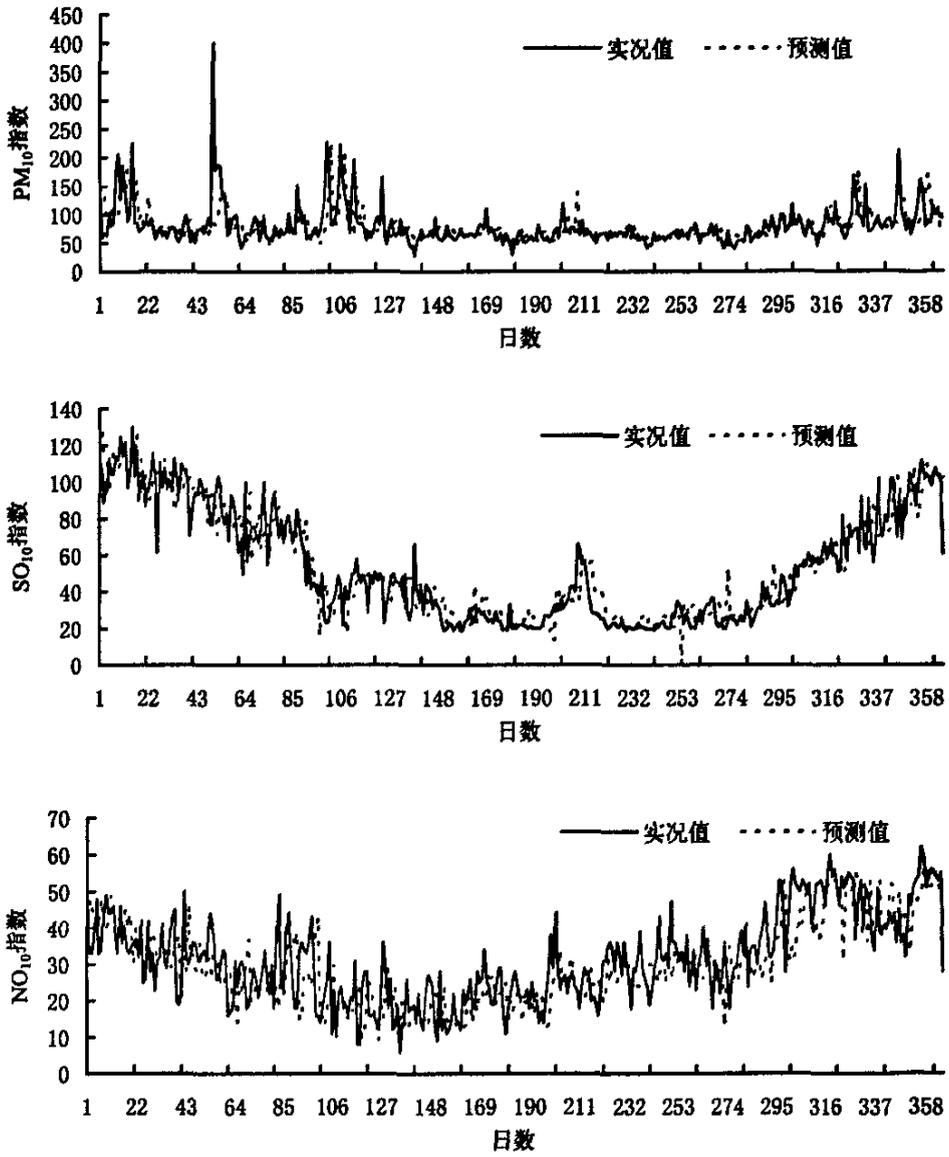


图 7.5 2005 年银川市空气污染动力统计预报实况值与预测值时间序列图

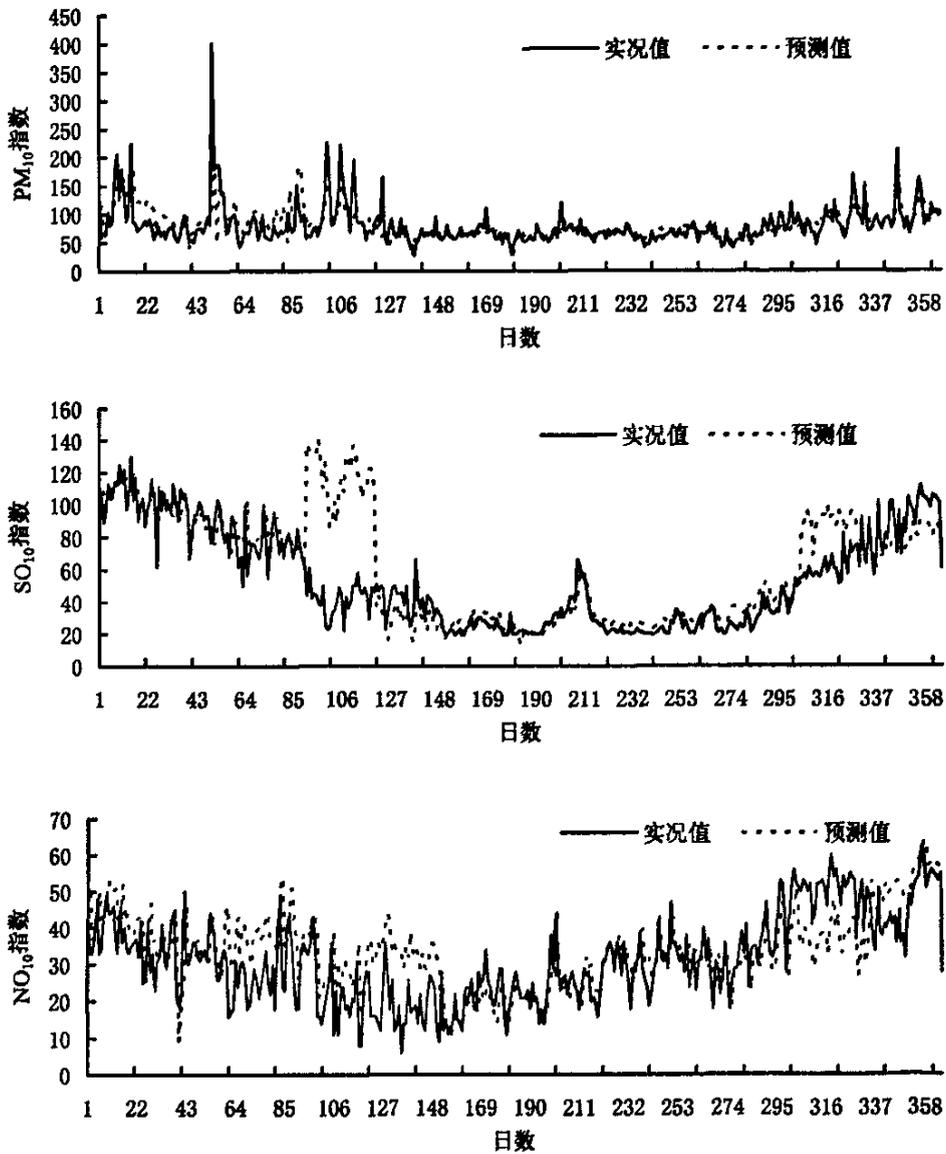


图 7.6 2005 年银川市空气污染多元回归统计预报实况值与预测值时间序列图

## 7.6 本章小结

1. 银川市空气污染预报系统由数值预报模式、动力统计模式和多元线性回归模式组成，三种方法独立运行，并相互验证，均具有较好的预测水平；

2. 三种预测模式的预报值与实况值相关系数均超过了 0.01 的信度检验；

3. 动力统计模式在银川市空气污染中预报预报效果最为显著，弥补了数值预报和纯数理统计预报模式的不足。CAPPS 数值模式与多元线性回归模式各有优缺点，对于气体污染物（ $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ ）数值模式的相对误差小于多元回归模式，相应的级别预报准确率也高于多元回归模式；而颗粒污染物（ $\text{PM}_{10}$ ），数值模式的预报能力较弱于多元回归模式；

4. 动力统计模式中的预报因子是从大气扩散方程出发推导简化而来的，既考虑了气象条件的作用，又考虑了起报日污染物浓度的作用，与纯数学统计预报方法相比，有着更加可信的物理基础；与数值模式相比，动力统计预报模式不需要污染源强排放清单，具有简便易行的优点；

5. 在动力统计模式中用前差分格式代替大气污染物平均浓度随时间变化的微分项，其好处在于可用起报日气象要素和污染物浓度实况来预测污染物浓度变率，从而避免了二次预报带来的误差；

6. 动力统计只选取了地面气象要素作为预报因子，而没考虑大气边界层内的变化，必然导致预报产生误差，这需要在今后的工作中进一步改进；

要进一步提高数值预报的准确率，首先是要提高对气象要素场的预报水平，特别是对风场的预报水平。在气象场的预测中，探空资料本身的质量直接影响预报的准确率。

## 第八章 总结与讨论

### 8.1 基本结论

本文对银川市近年来的空气质量现状、空气污染气象条件以及各类污染物的时空分布等特征,进行了全面、系统的分析、评价,并在此基础上建立了银川市空气污染预报系统,该系统由数值预报、动力统计模式和多元线性回归模式组成。现总结如下:

1. 银川市环境空气主要以自然尘和煤烟型影响为主,首要污染物为  $PM_{10}$ 。空气主要污染物高污染时段均出现在早晨 08 时和夜间 22 时左右,相对污染较轻时段均出现在深夜 03 时和中午 14 时左右。 $PM_{10}$ 、 $SO_2$  污染早晨高于傍晚, $NO_2$  污染则正好相反。春季  $PM_{10}$  污染最强,是夏季污染的 3.8 倍,冬季  $SO_2$ 、 $NO_2$  污染最强,分别是夏季污染的 8.4 倍和 2.5 倍,三种主要污染物夏季污染均最轻。 $SO_2$  污染采暖期是非采暖期的 4 倍以上,进一步说明采暖和生活燃煤是银川市  $SO_2$  的主要发生源;

2. 银川市大气边界层以中性及稳定类为主,不稳定类天气易出现在夏季,而秋冬季易出现稳定类天气,早晨及傍晚大气较稳定,午后大气处于不稳定状态。日最大混合层厚度夏季最大,冬季最小,一天中午夜(02 时)混合层厚度最小,午后(14 时)混合层厚度最大。银川市早晨、傍晚出现贴地逆温的几率冬季最大,夏季较小,与银川市主要污染物冬季污染最强,夏季污染较轻的监测结论相一致。在统计时段内,早晨、傍晚出现贴地逆温的几率分别为 70%和 44%。银川市逆温厚度 11~12 月最大,5~6 月相对较小,早晨、傍晚逆温平均厚度分别为 383 米和 189 米左右;

3. 银川市一年中多出现 2.0~2.9m/s、3.0~4.9m/s 级风,  $\geq 5m/s$  的风出现频率较小。春夏季(3~8 月)以 3.0~4.9m/s 级风为主,秋冬季以 2.0~2.9m/s 级风为主,小风易出现在秋、冬季节,而春季则易出现大风速段。一天中早晨及傍晚小风频率较高,而大风速段多出现在 14 时。秋冬季节静风频率较高,春季静风频率最低,一天中静风多出现在早晨,午后出现几率最小。银川市一年中偏北风占主导地位,偏西风出现频率最小,夏季以南风为主导风向,秋末到来年春季则盛行偏北风,一天中大部分时次偏北、偏南风出现频率高,而偏东、偏西风出现频率较低;

4. 在统计时段内,银川市因出现贴地逆温而导致环境空气污染增加的贡献率, $PM_{10}$  秋、冬、夏三季平均增加 26%, $SO_2$  和  $NO_2$  全年分别增加 40%和 25%。自然降水对银川市大气清洁的贡献作用非常明显,平均一次过程将直接减轻  $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$  污染分别达 31%、34%和 35%。在浮尘、扬沙、沙尘暴、大风四种天气中,浮尘天气导致  $PM_{10}$  污染最重,扬沙天气次之,沙尘暴天气相对较轻,随着其出现几率的不断增大,环境空气质量的等级也在随之增加,在统计时段内受上述四种天气的影响,可直接导致  $PM_{10}$  II~III 级平均污染浓度增

加 21%，IV、V 级的出现完全为沙尘天气所致；

5. 造成银川市污染超标的天气过程主要有 5 种类型：西北气流型、冷槽东移型、冷空气穿脊东移型、纬向气流型、西南气流型。通过对各种与超标有关的天气形势下的污染机制进行了分析，认为主要有以下两面的原因：一是由于锋面过境或高空风动量下传造成地面风速较大卷起地面或邻近地区的沙尘飘向银川市上空造成超标，如西北气流型、冷槽东移型。二是由于天气形势比较稳定且维持时间较长，对流较弱，造成污染物堆积从而引起超标，如纬向气流型、西南气流型。但也有是由于以上两方面的原因造成超标如冷槽东移型，在平均风力较大的情况下对流又相对较弱，而在银川冬半年这种天气形势是最常见的形势；

6. 银川市空气污染预报系统由数值预报模式、动力统计模式和多元线性回归模式组成，三种方法独立运行，并相互验证，均具有较好的预测水平。其中，动力统计模式中的预报因子是从大气扩散方程出发推导简化而来的，既考虑了气象条件的作用，又考虑了起报日污染物浓度的作用，并且用前差分格式代替大气污染物平均浓度随时间变化的微分项，其好处在于可用起报日气象要素和污染物浓度实况来预测污染物浓度变率，从而避免了二次预报带来的误差；与纯数学统计预报方法相比，有着更加可信的物理基础；与数值模式相比，动力统计预报模式不需要污染源强排放清单，具有简便易行的优点。

## 8.2 存在的问题和研究展望

1. 建议银川市加强冬季  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  污染治理，尤其是生活和采暖燃煤的使用。一方面，倡导使用清洁能源；另一方面，提倡节约能源，因为中国一次能源的 75% 来自燃煤，节约能源本身就可削减排放量，其潜力很大。春季需加强对  $\text{PM}_{10}$  的治理，一方面，加大城市绿化面积，增加绿地覆盖，发挥生态环境效益；另一方面，做好环境空气质量预测工作，以最大限度减少自然降尘对人体和生物的危害作用；

2. 银川市空气污染动力统计预报模式中，只选取了地面气象要素作为预报因子，而未考虑大气边界层内的变化，从而导致产生了一定的预报误差，这需要在以后的工作中进一步改进；

3. CAPPS 数值模式与多元线性回归模式各有优缺点，对于气体污染物 ( $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ ) 数值模式的相对误差小于多元回归模式，相应的级别预报准确率也较高于多元回归模式；而颗粒污染物 ( $\text{PM}_{10}$ )，数值模式的预报能力较弱于多元回归模式；

4. 要进一步提高数值预报的准确率，首先是要提高对气象要素场的预报水平，特别是对风场的预报水平。在气象场的预测中，探空资料本身的质量直接影响预报的准确率，因此在后续的研究工作中，除进一步提高 MM5 的预测水平外，还要加强探空资料的检误工作。

## 参考文献

- [ 1 ] 于桂云,金世洲,王洪涛.城市空气质量预报的意义及其进展[J].黑龙江环境通报,2002,26(3):80~83.
- [ 2 ] 罗云峰.空气污染与气候变化研究新动向.中国科学基金,2002,16(4):213~214.
- [ 3 ] 刘玉兰,肖云清.银川市空气质量超标的天气形势分析[J].气象科学,2002,23(4):460~466.
- [ 4 ] 陈万隆,肖静珍.混合层厚度、风速和稳定度对地面SO<sub>2</sub>浓度分布影响的数值试验[J].南京气象学院学报,1995,18(4):548~554.
- [ 5 ] 刘小红,洪钟祥,李家伦,等.北京地区严重大气污染的气象和化学因子[J].气候与环境研究,1999,4(3):231~236.
- [ 6 ] 高会旺,黄美元,王自发,等.东亚不同天气下的硫沉降分布[J].中国环境科学,1997,17(6):530~534.
- [ 7 ] 牛刚.合肥市空气污染水平分析及控制对策探讨[J].安徽化工,2005,31(3):46~48.
- [ 8 ] 胡杰,唐玉霖,王三反.大同市空气状况分析与防治[J].甘肃科技纵横,2004,33(5):25~26.
- [ 9 ] 郭立水,赵乐.承德市城市区域空气污染现状与治理措施[J].承德石油高等专科学校学报,2004,6(1):42~45,53.
- [10] 王志凌.太原市空气污染问题分析与防治对策[J].山西气象,2004(3):25~26.
- [11] 管华,陈沛云,宫少燕,等.河南省城市空气质量特征与污染防治对策[J].地域研究与开发,2005,24(2):125~128.
- [12] 何晓凤,蒋维楣,张小燕.南京市大气NO<sub>x</sub>扩散规律与防治对策研究[J].气象科学,2004,24(3):269~276.
- [13] 洪钟祥,胡非.大气污染预测的理论和方法研究进展[J].气候与环境,1999,4(3):226~230.
- [14] 陈明,李海波.国内外环保科技发展动向[J].辽宁科技参考,2001(6):9~11.
- [15] 气候变化、空气污染 日本与德国:朝着协调气候保护战略方面迈进[J].产业与环境,2001,23(1):105~105.
- [16] 佟彦超.城市空气污染预报及污染防治研究进展.中国环境科学学会大气环境分会,P.219.
- [17] 殷达中,刘万军.海外大气污染预报的状况及方法[J].气象科技,1997(1):19~23.
- [18] 吴兑,邓雪娇.环境气象学与特种气象预报[M].北京:气象出版社,2001.

- [19] 赵鸣, 苗曼倩. 大气边界层[M]. 北京:气象出版社, 1992.
- [20] 李宗恺, 潘云仙, 孙润桥. 空气污染气象学[M]. 北京:气象出版社, 1997.
- [21] 蒋维楣, 曹文俊, 蒋瑞宾. 空气污染气象学教程[M]. 北京:气象出版社, 1993.
- [22] F. 帕斯奎尔, F. B. 史密斯. 大气扩散[M], 北京:科学出版社, 1989.
- [23] 邓雪娇, 吴兑. 热带沿海近地层大气的湍流结构和谱特征[J]. 热带气象学报, 1997, 13(1):32~39.
- [24] 孙晓梅. 城市空气污染预报方法研究[J]. 环境保护科学, 2001, 27(1):6~8.
- [25] 唐长保, 隋波. 吉林市冬季SO<sub>2</sub>浓度预报方法. 吉林气科所科研报告, 1996, 23(1):39~50.
- [26] 雷孝恩, 张美根, 韩志伟, 等. 大气污染数值预报基础和模式[M]. 北京:气象出版社, 1998.
- [27] 中国科学院大气物理研究所, 空气污染数值预报模式系统[M]. 北京:气象出版社, 1999.
- [28] 吴增茂, 盛立芳, 刘烽. 城市区域大气质量数值预报方法的研究进展[J]. 气象科技, 1999, (1):11~15.
- [29] 韩志伟, 杜世勇, 雷孝恩, 等. 城市空气污染数值预报模式系统及其应用[J]. 中国环境科学, 2002, 22:202~206.
- [30] 张美根, 韩志伟, 雷孝恩. 天津市总悬浮颗粒物浓度分布的数值模拟[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(1):30~35.
- [31] 徐大海, 朱蓉. 大气平流扩散的箱格预报模式与污染潜势指数预报[J]. 应用气象学报, 2000, 11(1):1~12.
- [32] 朱蓉, 孟君艳. 城市空气污染数值预报系统CAPPS及其应用[J]. 应用气象学报, 2001, 12(3):267~278.
- [33] 朱蓉, 徐大海, 孟燕君, 等. 城市空气污染数值预报系统CAPPS及其应用[J]. 应用气象学报, 2001, 12:267~278.
- [34] 陈万隆, 肖静芬. 混合层厚度、风速和稳定度对地面S<sub>0</sub>浓度分布影响的数值试验[J]. 南京气象学院学报, 1995, 18(4):548~554.
- [35] 佟华, 肖静芬, 陈万隆, 等. 一个模拟S<sub>0</sub>浓度分布的数值模式研究[J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(3):371~377.
- [36] 刘宜飞, 朱瑞兆. 复杂地形下的地面风场的数值模拟及实验[J]. 太阳能学报, 1992, 13(1):8~14.
- [37] 李兰, 危万虎, 魏静, 等. 武汉市空气污染状况及其与气象条件的关系[J]. 湖北气

象, 2004(3):18~22.

[38] 康晓风, 张建辉, 刘红辉. 沙尘天气对我国城市空气质量影响的范围与强度分析[J]. 资源科学, 2002, 24(4):1~4.

[39] 赵庆云, 张武, 王式功. 空气污染与大气能见度及环流特征的研究[J]. 高原气象, 2003, 22(4):393~396

[40] 王建鹏, 卢西顺. 西安城市空气质量预报统计方法及业务化应用[J]. 陕西气象, 2001(6):5~8.

[41] 王红斌, 陈杰. 西安市夏季空气颗粒物污染特征及来源分析[J]. 气候与环境研究, 2002, 5(1):51~57.

[42] 杨义彬. 成都市大气污染及气象条件影响分析[J]. 四川气象, 2004, 24(3):40~44.

[43] 张蕾, 赵淑艳, 金永利. 北京地区低空风、温度层结对大气污染物垂直分布影响初探[J]. 应用气象学报, 2002, 13(特刊):115~121.

[44] 桑建人, 孙银川. 银川市PM<sub>10</sub>等气象条件分析[J]. 陕西气象, 2002(2):26~29.

[45] 李龙凤, 王新明, 赵利容, 等. 广州市街道环境PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>质量浓度的变化特征[J]. 地球与环境, 2005, 33(2):57~60.

[46] 王越, 栾英, 吴昊. 哈尔滨市空气污染指标时间变化规律的研究[J]. 环境科学与管理, 2005, 30(3):44~45.

[47] 司春冰, 宫春宁, 郑有飞. 呼和浩特市大气污染与天气气候的关系[J]. 气象科学, 2005, 33(2):173~177.

[48] 赵燕宁, 时兴合, 王式功, 等. 西宁地区污染气象特征与降水pH值的初步分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3):364~369.

[49] 谢宏斌. 影响南宁市空气质量的天气因素分析[J]. 云南环境科学, 2005, 24(5):28~31.

[50] 袁美英, 周秀杰, 张桂华, 等. 天气形势对哈尔滨市空气质量影响的初步研究[J]. 气象, 2005, 31(1):55~58.

[51] 周亚军, 熊亚丽, 肖伟军, 等. 广州空气污染指数特征及其与地面气压型的关系[J]. 热带气象学报, 2005, 21(1):93~99.

[52] 秦保平, 刘彩霞, 王长友, 等. 天津市空气污染预报方法[J]. 城市环境与城市生态, 2001, 14(4):11~12.

[53] 尚可政, 王式功, 杨德保, 等. 兰州城区空气污染预报的动力统计模型[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2002, 38(3):114~119.

[54] 王迎春, 孟燕军, 赵习方. 北京市空气污染业务预报方法[J]. 气象科技, 2001, 29(4):42~47.

- [55] 魏生生, 林学范. 北京城区空气污染浓度长期预测[J]. 气象, 1999, 25(1):43~47.
- [56] 吴万友, 姚丽文, 徐卫民, 等. 江西省主要城市空气质量预报研究[J]. 环境与开发, 2001, 16(3):9~11.
- [57] 杨文峰. 一种新的城市SO<sub>2</sub>污染统计预报方法及其应用[J]. 应用气象学报, 2003, 14(2):223~229.
- [58] 张永山, 郑水红. 模糊识别理论模型在城市大气污染预测中的应用[J]. 应用气象学报, 2005, 16(增刊):139~141.
- [59] 于秀林, 任雪松. 多元统计分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 1999.154-170..
- [60] 张尧庭, 方开泰. 多元统计分析引论[M]. 北京: 科学出版社. 1999.305-315.
- [61] 高惠璇. 实用统计方法与SAS系统[M]. 北京: 北京大出版社. 2001.310-330.
- [62] 高惠璇. 两个多重相关变量组的统计分析(1)(典型相关与典型冗余分析)[J]. 数理统计与管理, 2002, 21(1):57-64.
- [63] 中华人民共和国标准, GB/T13201—91, 北京: 标准出版社, 1992, 15-18, 附录B, 附录E
- [64] 国家环境保护总局环境工程评估中心. 环境影响评价技术方法. 北京: 中国环境科学出版社, 2005, 1-2.
- [65] 国家环境保护总局环境工程评估中心. 环境影响评价技术导则与标准. 北京: 中国环境科学出版社, 2005, 38-39.
- [66] 杨丽芬等编著. 环保工作者实用手册. 北京: 冶金工业出版社, 2001, 60-63.
- [67] 游荣高等. 边界层大气气溶胶浓度与尺度谱分布的时空变化. 大气科学, 1983, 7(1), 88-94.
- [68] 国家环境保护局、中国环境科学研究院编. 城市大气污染总量控制典型范例. 北京: 中国环境科学出版社, 1993, 41-48.
- [69] 汪新福等. 北京城区北部冬、夏季大气颗粒物化学成份和粒度分布. 大气科学, 1990, 14(2), 199-206.
- [70] 赵德山等. 北京市冬季大气气溶胶空气动力学尺度谱分布的研究. 大气科学, 1988, 12(2), 140-146.
- [71] 国家环境保护总局污染控制司编. 中国环境污染控制对策. 北京: 中国环境科学出版社, 1998, 90-97.
- [72] 赵德山等著. 煤烟型城市污染大气气溶胶. 北京: 中国环境科学出版社, 1991, 234-243.
- [73] 王明星著. 大气化学. 北京: 气象出版社, 1991, 67-78.
- [74] 苏维翰等. 北京城区秋冬季节气溶胶浓度分布规律及其与天气类型的关系. 大气科学, 1983, 7(4), 450-455.

- [75] 牛生杰等. 贺兰山地区沙尘暴沙尘起动和垂直输送物理因子的综合研究. 气象学报, 2002, 60(2).
- [76] 张书余. 城市环境气象预报技术[M]. 北京:气象出版社, 2002, 191-195.
- [77] 李小忠, 候棋棕. 城市大气稳定度分级模型的研究[J]. 工业安全与防尘, 2001, 27(4):27-31.
- [78] 尚可政, 王式功, 杨德保, 等. 兰州城区空气污染预报的动力统计模型[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2002, 38(3):114-119.
- [79] Haagen-Smit A. Chemistry and physiology of Los Angeles smog. *Ind Eng Chem*, 1952, 44(6): 1342~1346.
- [80] E P A of United States. Guideline for Use of City-specific EKMA in Preparing Ozone SIPs. EPA-3450 / 14-80-027, March 1981.
- [81] SAI. User's Guide to the Variable-Grid Urban Airshed Model(UAM-V). Systems Applications International1. SYSAPP-99-95127r3. 1999.
- [82] Byun D W, Ching J K S. Science Algorithms of the EPA MODELS-3 Community Multiscale Air Quality(CMAQ)Modeling System. EPA / 600 / R-99 / 030, US Environmental Protection Agency, 1999.
- [83] ENVIRON International Corporation. User's Guide of the Comprehensive Air Quality Model with Extensions (CAMx) Version 3. 10. Novato, California, 2002.
- [84] Manins P C. Air Quality Forecasting for Australia's Major Cities-Final Report. Project Management Committee: CSIRO Atmospheric Research. Aspendale, Australia, 2001.
- [85] Carter W P L. Documentation of The SAPRC-99 Chemical Mechanism For VOC Reactivity Assessment. Final Report to California Air Resources Board, 2000.

## 致 谢

本文是在缪启龙教授及桑建人高级工程师两位导师的悉心指导下完成的。在论文完成之际，首先谨向辛勤指导和培养我的导师缪启龙教授和桑建人高工致以最衷心的感谢！老师严谨求实的治学态度、精深渊博的学术造诣、淡泊名利、平易近人的作风，使我受益匪浅，他们都是我今后人生的楷模。

感谢宁夏气象台台长赵光平先生，无论是作为师长还是领导，他都给予了我最大的支持和帮助，提供给我优越的学习条件，使我的学业得以顺利进行。

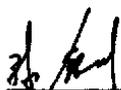
非常感谢南京信息工程大学大气科学系和研究生部的老师们几年来对我的诸多帮助，感谢郭品文、朱伟军等老师给予我的支持和指导；同时特别要感谢宁夏气象局党组给了我学习深造的机会，感谢宁夏气象台领导及全体同仁在我学习期间给予的关照；感谢宁夏气象台李艳春、郑广芬、胡文东、姚宗国、马立文等同志在我完成论文过程中给予的无私帮助。

最后特别要感谢我的妻子张君丽女士给予我的理解和支持，在我学习期间，她承担了所有的家庭重任，解除了我的后顾之忧；感谢我亲爱的儿子孙乐峰带给我无穷的乐趣和学习动力；感谢我的亲友给予我多方的关照。正是家人无微不至的关怀和默默的奉献，帮助我顺利完成学业。同时我要将这篇论文作为新年礼物献给我慈祥的父母。

# 学位论文独创性声明

本人郑重声明：

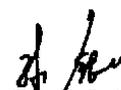
- 1、坚持以“求实、创新”的科学精神从事研究工作。
- 2、本论文是我个人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。
- 3、本论文中除引文外，所有实验、数据和有关材料均是真实的。
- 4、本论文中除引文和致谢的内容外，不包含其他人或其它机构已经发表或撰写过的研究成果。
- 5、其他同志对本研究所做的贡献均已在论文中作了声明并表示了谢意。

作者签名：  \_\_\_\_\_

日 期： 2007.1.8

# 学位论文使用授权声明

本人完全了解南京信息工程大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或其指定机构送交论文的电子版和纸质版；有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅；有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索；有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

作者签名：  \_\_\_\_\_

日 期： 2007.1.8