

# 武汉城市空气污染状况及其与气象条件的关系—S6

李兰 危万虎 魏静 王祖承 杨超

(武汉城市气象工程技术中心 武汉 430074)

## 摘要

用 2002 年全年的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$  的逐日平均浓度资料和武汉市观象台地面四个时次、高空两个时次的观测资料,及 2002 年的历史天气图资料对武汉市空气污染状况及其与气象条件的关系进行了天气气候学和动力统计学分析,结果表明,武汉市的主要污染物为  $\text{PM}_{10}$ ,其次为  $\text{SO}_2$ 。冬季各污染物的平均浓度最高,其次为秋季,夏季最低,冬季各污染物与气象要素的相关性最好。我国北方沙尘暴天气过程、地面冷空气从河西走廊南下影响武汉地区时,在一定的上空系统配合下会对武汉市空气质量造成严重影响。

关键词 空气污染; 相关性; 天气系统

随着城市工业发展和技术的进步,大气污染问题正在引起人类普遍关注和各级政府的高度重视。污染问题已经成为各国的主要公害之一,城市的繁荣和经济的发展给武汉带来了令人瞩目的变化。同时,大气污染问题也变得越来越严重。2000 年 11 月 24 日中国国家环境保护总局和中国气象局联合下文(环发[2000]231 号)规定自 2001 年 6 月 5 日起,发布 47 个环境重点保护城市空气质量预报,武汉市属国家环境重点保护城市。湖北省气象科学研究所和武汉市环境监测站从 2001 年 6 月 5 日起共同发布空气质量预报。本文利用 2002 年度逐日的各污染物浓度实测值和相关的气象资料,对污染物浓度与气象条件的关系进行了分析,其结果对于武汉市的空气质量预报,以及未来武汉市的城市建设提供了一定参考依据。

## 1 空气污染资料和气象资料

本文所用污染物浓度资料由武汉市环境监测站提供,为市区 6 个观测站点(汉阳沌口、东湖梨园、汉阳月湖、武昌紫阳、青山厂前、汉口花桥)的日  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$  的浓度平均值,即空气质量日报,气象资料由国家基本站武汉市观象台地面四个时次(02 时、08 时、14 时、20 时)、高空两个时次(08 时、20 时)的观测资料,以及我国 2002 年的历史天气图资料。

## 2 污染物浓度分布特征

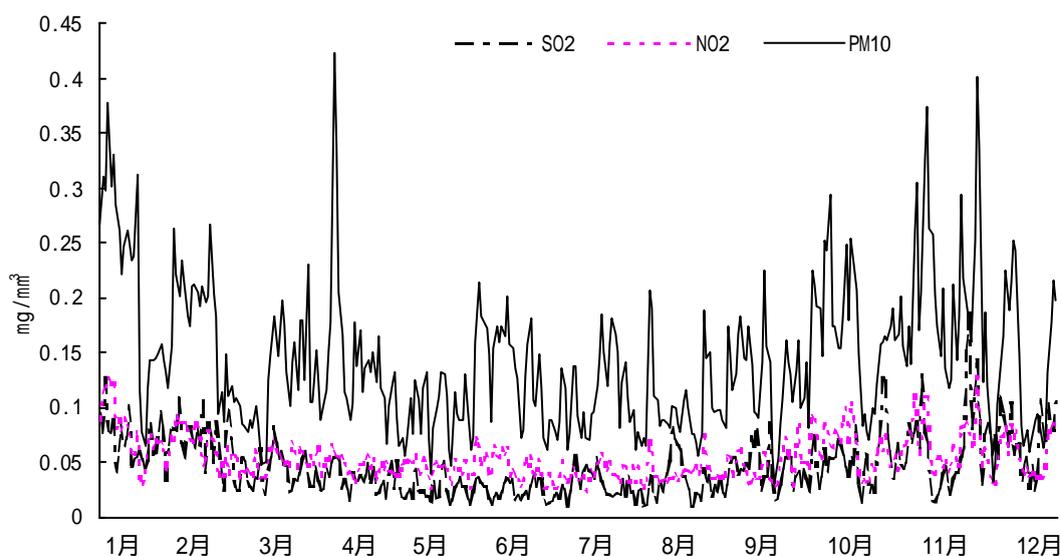


图 1 2002 年武汉市污染物浓度变化图

武汉市地处江汉平原属东亚季风气候区,天气和气候的特点有明显的季节性变化,同时,在地形上受鄂西山地与鄂东北同柏、大洪山的两山相夹,以及大别山、幕阜山脉的阻挡,武汉市是

冷空气南下和东灌的通道，地面风具有明显的地形特征，天气形势变化剧烈。各污染物浓度受扩散条件的影响也有明显的季节变化特征。现将不同季节的污染物浓度分布进行分析比较。

从图 1 可以看出，PM<sub>10</sub> 年度极大值出现在春季，且变化幅度比 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 要大的多，一般情况下 PM<sub>10</sub> 浓度远远高于 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>。表 1 为不同季节各污染物浓度的平均值。从各季的污染物平均浓度来看，冬季各种污染物浓度平均值都是最大的，其次是秋季，夏季各污染物浓度平均值都是最低的，各个季节 PM<sub>10</sub> 的平均浓度都远远高于 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>。

表1 2002 年污染物浓度季节平均值【mg / m<sup>3</sup>】

	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>
冬	.068	.065	.170
春	.033	.048	.126
夏	.029	.041	.113
秋	.053	.060	.167
Total	.046	.053	.144

为了便于公众理解，在公开发布空气污染实况和预报前，要将各污染物浓度转化为公众容易理解的空气污染指数(API)，指数的转换主要依据该污染物对人体健康的影响<sup>[1]</sup>，取当日污染物分指数最大值为当日的空气污染指数，该项污染物为当日的首要污染物。以首要污染物 API 指数按照国家空气质量评定标准将空气质量进行等级划分，2002 年武汉市各个季节空气质量等级评定见表 2。

表 2 2002 年武汉市空气质量状况

	优	良	轻微污染	轻度污染	中度污染	中度重污染	重污染
冬		44	31	13	1	1	
春	4	63	23	1			1
夏		73	19				
秋	1	36	43	10	1		

其中全年首要污染物有 360 天为 PM<sub>10</sub> (表略)，占 99%，5 天为 SO<sub>2</sub>，占 1%。可见 PM<sub>10</sub> 为武汉市最主要污染源。从表中还能看出，春季的空气质量的变化范围是最大的，从优到重污染，而夏季变化范围是最小的，仅出现良好和轻微污染。

### 3 主要气象因子特征

为了研究气象条件对污染物浓度分布的影响，统计了武汉市的地面风、925 百帕以下逆温、降水量等主要影响低层大气扩散条件的气象要素的特征 (表 3)。

从表中可以看到，各个季节的静风频率都比地面主导风向频率高，地面主导风向随季节有较明显的变化。但主导风向频率不高。静风频率高是地面污染物浓度高的一个重要因素。同时，逆温是阻挡污染物垂直扩散的重要因子，冬季、秋季的接地逆温频率、低悬逆温频率较高，静风频率大，这也是冬秋二季各种污染物浓度平均值高的重要原因。

表 3 主要气象因子气候特征

季节	降水量 (mm)	地面静风频率 (%)	地面主导风向 频率 (%)	地面平均风速 (m/s)	逆温频率 (%)	
					接地逆温	低悬逆温
冬	216.6	37	NNE(13%)	0.9	42	23
春	653.8	22	NE(10%)	1.2	20	21
夏	505.2	19	ENE(11%)	1.3	5	13
秋	140.5	30	NNE(11%)	1.2	37	28

另外，降水也是影响污染的重要因子，去年春季降水量为 653.8mm,夏季为 505.2mm,秋 140.5mm,冬为 216.6mm。春季降水量较常年偏多。冬秋两季降水量小也是污染浓度高的原因。

## 4 污染物浓度与气象因子相关分析

### 4.1 污染物浓度与气象要素之间的关系

武汉市大气污染物主要来源于本地排放和其他地区污染物的平流输送，这与武汉市地形、气候特点，天气系统影响等密切相关，假定某一段时间地形和污染物的排放量相对稳定，此时影响武汉市空气质量的主要因子就是气象条件。因此，通过气象条件和污染物浓度、污染事件之间的相关分析，可以寻找武汉市空气质量的预报方法。

为了寻找污染物浓度与气象要素之间的关系，将温、压、湿、风的地面常规观测资料和 850 百帕（边界层顶）以下各层高空观测资料与污染物浓度逐日平均值之间进行相关分析，同时，为了寻找具有预报意义的气象因子，将前一天、前两天的气象要素与当日的污染物浓度进行相关分析。现将各个季节相关性较好，且相关系数通过 0.01 信度检验的因子列在表 4，分析发现，在不同的季节，各污染物浓度与气象要素之间相关性是不一样的，其原因可能是因为不同季节的环流系统，地面影响系统不同，其对污染物扩散的影响不同，所以，预报员在不同的季节所应该关注的主要气象因子也不同，同时，分析发现，当日污染物浓度与前一、二日的气象要素之间的相关性并不是太好，这某种程度说明武汉地区的天气形势变化较剧烈。

表4 污染物浓度与气象要素的相关系数(Pearson Correlation)

季节	要素	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>
冬季	日平均风速		-.708	-.574
	14时地面相对湿度	-.624	-.635	-.535
	14时地面气温		.441	.602
	925百帕温度		.425	.603
	位温梯度	.304	.803	.778
	温度梯度	.306	.804	.780
春季	日平均风速		-.471	
	日平均相对湿度	-.541	-.311	-.601
	850百帕高度	.527	.445	.359
	1000百帕温度露点差	.542	.323	.628
	位温梯度	.408	.287	.318
	温度梯度	.410	.291	.321
夏季	日平均风速		-.555	-.382
	日平均相对湿度	-.409		-.475
	850百帕温度露点差		.363	.505
	925百帕平均风速		-.415	-.423
秋季	日平均风速	-.271	-.727	-.533
	14时地面相对湿度	-.442	-.611	-.331
	925百帕温度露点差	.331	.555	.302
	1000百帕平均风速		-.526	-.337
	位温梯度	.437	.475	.504
	温度梯度	.442	.481	.510

从表4可见，NO<sub>2</sub>和地面日平均风速的相关性最好，在各个季节都有一定的相关性，其次是PM<sub>10</sub>，SO<sub>2</sub>和风速的相关性不明显，SO<sub>2</sub>和风向有一定的相关性，当东北风速达到5~6m/s时，SO<sub>2</sub>浓度随风速的增加而增加，其主要原因是武汉市的SO<sub>2</sub>污染源比较单一，主要污染源位于城市东北角的武汉钢铁公司，当东北风风速不太大时，不会引起下风方的观测站的SO<sub>2</sub>浓度增加，当东北风速达到5~6m/s时，既便于工业区内污染物向市区扩散，又不足以使污染物迅速扩散到市外，造成市区环境空气质量恶化。同时，各个季节NO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>和相对湿度都有一定的负相关性，这可能是由于化学反应的原因。

降水对空气中污染物的清洗是明显的，特别是较大的降水，但由于日降水的统计时段和污染物浓度的统计时段不能很好的对应，无法给出准确的统计数据。

大气稳定度状况实质是大气热力过程和动力过程对湍流的发生发展或抑制能力的一种量度，气温的垂直变化表征了大气层结的热力不稳定状况，温度梯度和位温梯度对于PM<sub>10</sub>的影响用地面到925百帕的温度变化和位温变化表示，而对NO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>的影响，在冬季用地面到1000百帕的温度变化和位温变化表示，其它季节用地面到925百帕的温度变化和位温变化表示。

其中位温

$$q(z_i) = T(z_i) \left[ \frac{1000}{P(z_i)} \right]^{0.288}$$

从表4还可以看出，冬季污染物与稳定度的关系较好，而其它季节的指示意义不太好，其中一个原因是其它季节日照时长，08时和20时的高空资料对日稳定度的代表意义不如冬季好。另外，在春季，当北方出现沙尘暴天气过程时，不稳定天气下，污染物容易通过高空气流输送到市区上空造成严重污染。同时，春季容易发生大风，当空气干燥时，容易将地面的尘土扬起使空气中可吸入颗粒物增加。夏季由于对流发展太旺盛，污染物浓度普遍较低，已经看不出什么相关性。

总体来看，冬季各污染物和气象要素的相关性最好。

#### 4. 2 污染物浓度统计预报方程

综上所述可知，冬季是一年中污染物平均浓度最大的季节，同时也是与气象因子相关性最好的季节，选取因子为相关性好并获取方便的气象因子，同时考虑因子的独立性，进行逐步回归分析得到冬季污染物浓度统计预报方程：

$$\text{PM}_{10}: \quad y = 0.180 + 0.014\Delta T + 0.003B - 0.033\bar{U} \quad (1)$$

$$R = 0.823, \quad R^2 = 0.677, \quad F = 59.334, \quad P = 0.000$$

$$\text{SO}_2: \quad y = 0.117 - 0.001E \quad (\text{东北风速} < 5\text{m/s}) \quad (2)$$

$$R = 0.670, \quad R^2 = 0.449, \quad F = 69.985, \quad P = 0.000$$

$$\text{NO}_2: \quad y = 0.090 + 1.07 \frac{\Delta T}{\Delta Z} - 0.012\bar{U} - 0.0003E \quad (3)$$

$$R = 0.880, \quad R^2 = 0.774, \quad F = 96.819, \quad P = 0.000$$

$R$  为复相关系数， $R^2$  为判定系数。方程中  $\bar{U}$  表示日平均风速， $E$  表示14时的相对湿度，(1)式中的  $\Delta T$  表示925百帕与地面温度差， $B$  表示14时的温度。(3)式中的  $\frac{\Delta T}{\Delta Z}$  表示1000百帕与地

面温度梯度。

三个方程都有统计学意义，其中以方程（3）的复相关系数最高，判定系数值最大，指示意义最好，（2）式仅限于东北风速 $< 5m/s$ 时使用。同时，本方程没有考虑污染源的变化，只考虑了平均情况。

## 5 天气系统对武汉市空气质量的影响

由于武汉市的首要污染物主要为 $PM_{10}$ ，本文主要讨论天气系统对 $PM_{10}$ 浓度的影响。

天气形势是高低空大气扩散能力和稳定度的综合反映，天气系统的移动和变化在对武汉市污染物扩散产生影响的同时，其气团本身由于源地不同，具有的空气质量特性不同也会对预报区域产生影响，武汉市由于其地理位置的特殊性，是各路冷空气南下的必经之地，而由于冷空气形成的源地不同，移动路径不同，其本身的空气质量及其移动过程中产生的变化都会以平流的形式影响预报区域。从前面气象要素的相关性分析也能发现， $PM_{10}$ 与地面风速的相关性并不太好，即便是冬季，相关系数绝对值也不到0.6，某种程度说明气团本身空气质量对武汉市空气质量的影响。所以，在关注本地区污染源以及气象要素、天气系统对扩散条件影响的同时，要关注天气系统及其移动气团的空气质量特性。

### 5.1 北方沙尘暴天气过程对武汉市空气质量的影响

根据气象观测规范，沙尘天气包括浮尘、扬沙和沙尘暴，其中水平能见度小于500m的沙尘暴又称强沙尘暴。同一次天气过程中，若我国天气预报区域内有3个或3个以上国家基本（准）站在同一观测时次出现了沙尘暴天气称为一次沙尘暴天气过程。

北方前期持续的高温少雨导致北方大部分地区浅层土壤墒情不断下降，入春后多大风天气，更是加剧了土壤水分的散失，地表更为干燥，在冷空气频繁南下的过程中，常伴有蒙古气旋的产生，致使我国北方地区沙尘天气接连不断。当冷空气位于蒙古西部，我国西南地区有暖低压向东发展，冷锋将沿河套地区南下，进入暖槽，称北路冷空气，如果地面冷高压长轴呈东北—西南向进入新疆，主力经河西走廊南下，川黔地区暖低压向东方向伸展，直达华北一带，冷锋从河套西侧南下，称西北路冷空气。当北路或西北路干冷空气南下时，北方如果有严重的沙尘暴天气过程，会在深厚的干冷气团的携带下影响我省。并严重影响我市的空气质量。

2002年春季我国北方共出现11次沙尘暴天气过程<sup>[2]</sup>，在北方冷空气南下的过程中，有3次过程明显影响到武汉市的空气质量，其中2次使武汉市区的江夏地面观测站出现浮尘天气，使武汉市 $PM_{10}$ 浓度出现2002年度最大值。

在3月30日—3月31日的北方沙尘暴过程中，西北干冷空气沿河套西侧南下，并在500百帕长江中上游高压脊的配合下影响湖北省，30日14时，我省地面有17个观测站出现沙尘天气，到晚上20时共有21个地面观测站出现沙尘天气（图2）（其中20个站为浮尘，一个站为扬沙，武汉市江夏地面观测站为浮尘天气）。从图上可以看到，武汉市北部地区出现大范围的沙尘天气。在地面偏北气流的引导下，对武汉市空气质量造成了恶劣影响，武汉市31日的 $PM_{10}$ 浓度值达到 $0.424mg/mm^3$ （比前一天增加 $0.247 mg/mm^3$ ），为2002年度 $PM_{10}$ 浓度最大值，达到重污染。研究表明，浮尘天气中的微尘、细沙多为远方沙尘通过高层气流传输而来<sup>[3]</sup>。

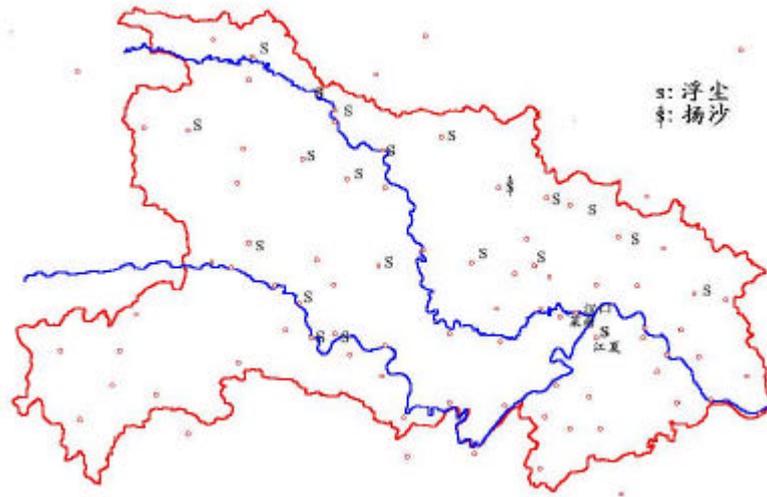


图2 2002年3月30日14时—20时湖北省沙尘天气图

## 5.2 武汉市轻度以上污染日（ $PM_{10}$ 浓度 $>0.250\text{ mg}/\text{mm}^3$ ）的影响天气系统

冷空气南下影响武汉地区的主要路径有三条，主力经河西走廊南下影响武汉地区，称西北路冷空气，由于冷高压来自于干燥的西北地区，气团干冷而多微尘，当冷空气从华北、东北平原南下时称为东路冷空气，东路冷空气由于来自于平原，夏季甚至有时中心位于海上，其气团本身较潮湿洁净，当冷空气从河套南下时称北路冷空气。由于冷空气南下的路径不同，同时由于和高空环流的配置不同，对武汉市空气质量的影响也有很大差异。

2002年武汉市共出现轻度以上污染日28天，对这28天的影响天气系统进行分析，结果如表5所示。

表5 武汉市轻度以上污染日与影响天气系统

日期	影响系统	低空逆温(925百帕以下)
1月1—8日	地面冷空气从河西走廊南下（西北路），500百帕高压脊控制	08时，20时接地逆温
1月11日	地面高压控制，500百帕高压脊前	08时，20时接地逆温
1月15日	地面暖低压东部，500百帕高空槽前	08时低悬逆温底在984百帕，20时接地逆温
1月29日	地面冷空气从河西走廊南下（西北路），500百帕弱高压脊前	08时接地逆温
2月12日	500百帕高压脊前	08时，20时接地逆温
3月30日-4月1日	地面冷空气从河西走廊南下（西北路），500百帕高压脊控制北方沙尘暴天气	08时：30日，31日接地逆温，1日低悬逆温底在1000百帕 20时：30日接地逆温，29日、31日低悬逆温底在972百帕、948百帕
10月4日	地面鞍型场，500百帕弱高压脊前	08时，20时接地逆温
10月6日	地面冷空气从河套南下（北路），500百帕高压脊前	08时，20时接地逆温
10月14日	地面均压场	08时，20时接地逆温
11月7-8日	地面冷空气从河西走廊南下（西北路），500百帕高压脊前	08时，20时接地逆温
11月11-14日	地面冷空气从河西走廊南下（西北路），500百帕高压脊前	08时：11、12日接地逆温，13、14日低悬逆温底在989、983百帕 20时：10、11、12日接地逆温，13日低悬逆温底941百帕
11月30-12月2日	地面冷空气从河套西侧南下（西北路），500百帕高压脊前	08时：30日低悬逆温底在983百帕，1日接地逆温 20时：30日接地逆温，
12月15日	地面鞍型场，	08时：低悬逆温底在1000百帕， 20时：低悬逆温底在1000百帕

从上表可以看出，在冬、春、秋季，冷空气从西北路径南下时，容易造成连续高污染日，同时还能看到，西北路冷空气多半都有高空脊配合，其空间配置深厚，同时，偏西路地面冷高压在其翻越青藏高原时，高压势力减弱，其前沿冷锋也减弱趋向锋消，地面风速较小，武汉地区处

于高压脊前的下沉气流区域内，大气层结稳定，低层常伴有低空逆温发生，本地天气晴稳，易使污染物堆积，导致污染物浓度升高。同时也由于冷空气来自于干燥多风沙的西北地区，气团湿度较小，气团本身含尘量高，在北方发生沙尘天气过程时，气团本身就是一个严重的污染源，所以，西北路冷空气南下容易使武汉市出现连续的高污染日。而东北路冷空气南下时由于没有山脉的阻挡，风速较大，而冷空气来自于平原，本身空气质量较好，同时，由于东路冷空气常常没有高空脊配合，冷空气浅薄，低空多为上升气流，地面吹冷湿的偏北风，常形成持续的降水天气，有利于大气的净化和污染物的扩散。所以，当东路冷空气影响武汉市时，空气质量常常较好。

## 小结

(1) 从武汉市污染物浓度特征分析得出武汉市的首要污染物主要为PM<sub>10</sub>。其次为SO<sub>2</sub>。

(2) 污染物浓度与气象因子的相关分析结果是冬季相关性最好。并通过逐步回归得出冬季污染物浓度的统计预报方程。

(3) 天气系统的移动和变化严重影响武汉市的空气质量，当北方发生沙尘暴过程时，如果冷空气从北路或西北路南下影响武汉地区时，会严重影响武汉市空气质量。在冬春秋三季，当冷空气从西北路南下，高空有高压脊配合时，容易造成武汉市连续高污染日。而东北路冷空气南下影响武汉地区时，会使空气质量得到明显的改善。

## 参考文献：

- [1] 吴兑，邓雪娇. 环境气象学与特种气象预报. 北京：气象出版社. 2001.322~324
- [2] 牛若芸，薛建军. 2002春季我国沙尘天气特征及成因分析. 气象, 2003, 29 (7) : 43~48
- [3] 张书余. 城市环境气象预报技术. 北京：气象出版社.2002.99~101