

## 降水对武汉2次空气污染过程的湿清除特征

李德俊<sup>1</sup>,熊守权<sup>1</sup>,柳草<sup>2</sup>,熊洁<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>湖北气象服务中心,武汉 430205;<sup>2</sup>武汉中心气象台,武汉 430074)

**摘要:**为了研究降水对空气中污染物冲刷作用,利用2014年秋季发生在武汉市2次持续性空气污染过程的地面空气质量、气象观测和雨滴谱等监测资料,对比分析了不同类型降水对雾霾天气中污染物的湿清除特征。结果表明:(1)这2次过程首要污染物均为颗粒污染物PM,在均压场天气条件下,污染物不易扩散,容易累积叠加,导致“09.26—29”和“11.13—24”2次重度雾霾天气过程,过程末期由于分别受对流云和层状云降水的冲刷,各污染物浓度迅速下降,空气质量显著好转;(2)“09.26—29”过程后期受对流云降水影响,对各污染物清除效果依次是PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>颗粒污染物最好,O<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>次之,最差的是CO,而受层状云降水影响的“11.13—24”过程,对各污染物清除效果依次是PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>最好,NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>和CO次之,最差的是O<sub>3</sub>;(3)通过这2个过程分析,不同类型降水对应的平均碰并系数 $E$ 也不同,武汉地区对流云和层状云降水对气溶胶的平均碰并系数分别可取0.33~0.43和0.25~0.35。

**关键词:**降水;空气污染过程;颗粒污染物;清除效果;碰并系数

中图分类号:P426

文献标志码:A

论文编号:casb16090061

### Wet Scavenging Characteristic of Precipitation in Two Air Pollution Processes in Wuhan

Li Dejun<sup>1</sup>, Xiong Shouquan<sup>1</sup>, Liu Cao<sup>2</sup>, Xiong Jie<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430205; <sup>2</sup>Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074)

**Abstract:** To study the scavenging effect of precipitation on pollutants in the air, a comparative analysis of wet scavenging characteristics of different types of precipitation were conducted by using the air pollution monitoring data, surface meteorological observation data and rain spectrum monitoring data of two air pollution processes in Wuhan in autumn, 2014. The results showed that: (1) the main pollutants in the two processes were PM pollutants, and under the condition of stable atmospheric stratification and slight wind, the air pollutants were difficult to spread and easy to accumulate, leading to “09.26–29” and “11.13–24” two severe air pollution processes, until influenced by the convective clouds precipitation and stratiform clouds precipitation, respectively, the pollutant concentrations decreased rapidly and the air quality was significantly improved; (2) in the later period of “09.26–29” process which was influenced by the convective clouds precipitation, the wet scavenging effect on PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> was the best, the effect on O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> was the second, and the effect on CO was the worst, while in “11.13–24” process, which was influenced by the stratiform clouds precipitation, the wet scavenging effect on PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> was the best, the effect on NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and CO was the second, and the effect on O<sub>3</sub> was the worst; (3) through the analysis of the two processes, the two average scavenging coefficients  $E$  corresponding to different types of precipitation were different, the  $E$  of convective clouds precipitation and stratiform clouds precipitation on aerosol was 0.33–0.43 and 0.25–0.35 in

**基金项目:**国家重点研发计划全球变化及应对重点专项“云水资源评估研究及应用示范”(2016YFA0601700);我国大气重污染累积与天气气候过程的双向反馈机制研究重点专项“四川盆地、长江中下游及东北平原重污染过程大气污染物与低层气象要素垂直结构及其时空演变研究”(2016YFC0203304);湖北省气象局科技发展基金“湖北不同云系增雨作业概念模型研究”(2016Y06)、“武汉市空气污染物浓度等级下降的降水阈值研究”(2016Q16)。

**第一作者简介:**李德俊,男,1974年出生,湖北荆州人,高级工程师,硕士,主要从事云与降水物理、雷达和卫星资料分析应用研究。通信地址:430205湖北省武汉市东湖新技术开发区金融港2路6号,Tel:027-81804967,E-mail:esldj@163.com。

**收稿日期:**2016-09-12,修回日期:2017-01-18。

Wuhan, respectively.

**Key words:** precipitation; air pollution process; PM; scavenging effect; collision efficiency

### 0 引言

随着经济规模的迅速扩大和城市化进程的加快,污染物的排放总量不断增加,污染范围不断扩大,中国雾霾天气出现频率和强度有明显增加趋势,重度雾霾天气持续时间长且范围越来越大,如中京津冀、长三角、中三角、珠三角、长株潭等城市群地区气溶胶污染日趋严重,灰霾天气显著增多<sup>[1-3]</sup>,已经引起社会广泛关注。不同地区空气污染特征、不同灰霾污染过程与形成机制等的研究表明:空气污染与能见度、温度、地面风向和风速、近地层逆温和降水等诸多气象因子密切相关,国内许多学者根据空气污染特征与气象因子关系建立空气污染预报系统和潜势预报模型等方面也进行了相关探索研究<sup>[6-11]</sup>。

在发展规模、地理环境和排放量相对稳定的前提下,气象要素的影响占据主导地位,而其中一个主要因素是降水。降水对大气气溶胶的清除是维持大气中悬浮粒子源汇平衡、大气自清洁的重要过程,对气溶胶粒子有着显著的湿清除作用,采用清除系数来研究气溶胶的湿沉降作用已得到广泛的使用<sup>[12-13]</sup>。彭红等<sup>[14]</sup>分析了碰撞效率、雨滴尺度谱和气溶胶尺度谱等对清除系数的影响,得到了中国两广地区降雨过程中的经验平均碰撞效率。上述研究从污染的特征、条件、成因和机理对1~2个个例进行了研究,但主要集中在北方和东部发达地区。清除系数 $\Lambda(dp)$ 表示尺度为 $dp$ 的气溶胶被雨滴所清除的速率。Mircea等<sup>[15]</sup>得到了清除系数与雨强的指数形式的经验表达式,其中的经验系数均取决于当地的气溶胶尺度谱和雨滴尺度谱等因素。降水对武汉地区PM颗粒污染物和大气污染物浓度的改变量或湿清除能力究竟多大?各污染物浓度改变量与降水量和气溶胶浓度大小哪个关系大?不同类型降水(如对流云和层状云降水)对各污染物清除特征有何差别?这些都有待研究。

2014年9月26—29日和11月14—23日武汉地区经历了2次持续性重度空气污染过程(分别记为“09.26—29”过程、“11.13—24”过程)。本研究利用地面空气质量、气象观测和雨滴谱等监测资料,对这2次持续性空气污染过程特征,并结合实测雨滴谱等资料对比分析这2次降水过程对各污染物的湿清除特征,以期了解武汉地区持续性空气污染过程特征和降水对武汉地区PM颗粒污染物和大气污染物浓度的改变量或湿清除能力,同时也为本地空气质量监测预警、数值

模式模拟湿清除特征和人工改善空气质量活动提供参考依据。

### 1 资料与方法

#### 1.1 资料来源

本研究所使用的资料包括2014年9月和11月武汉市AQI数据和逐时空气质量监测数据,数据分别源自湖北省环境保护厅网站(<http://www.hbepb.gov.cn/>)和武汉市环境空气质量实时发布系统网站(<http://ft.whepb.gov.cn:8090/Default.aspx>)。武汉市空气质量发布系统实时发布武汉市14个监测子站的空气质量监测数据,本研究主要摘录了汉口吴家山监测子站监测资料(包括PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、CO、O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>逐小时质量浓度),位置具体分布情况见图1。

气象资料主要包括2014年9月和11月来自武汉市气象局的武汉站观测资料(站点分布见图1)。武汉站观测资料含主要包括地面观测资料、探空资料、LNM激光雨滴谱仪(见表1)等资料,其中地面资料包括逐小时的温度、风速、风向、湿度、能见度等气象参数的地面观测资料,激光雨滴谱仪每分钟采样1次实时测量雨滴谱分布等数据。

#### 1.2 湿清除分析方法

(1)空气中气溶胶粒子浓度变化率<sup>[16]</sup>可以表示为公式(1)。

$$\frac{dC}{dt} = -\Lambda C \dots\dots\dots (1)$$

其中, $c$ 为物种(气溶胶粒子)浓度; $\Lambda(h)$ 为降水清除系数,它表示大气中气溶胶粒子在单位时间内被雨滴捕获后清除的比率,通常表示为降水强度的指数形式,见公式(2)。

$$\Lambda = A \times R^B \quad \Lambda = A * R^B \dots\dots\dots (2)$$

其中, $R$ 为雨强(mm/h), $A$ 、 $B$ 为拟合参数,取决于雨滴谱分布、气溶胶谱分布和雨滴与气溶胶粒子的碰并系数。

(2)假定气溶胶粒子粒径很小,相对静止大气其下落速度可忽略,于是单位时间内,降水粒子对气溶胶的总质量清除率<sup>[17]</sup>可写为公式(3)。

$$\Lambda = \frac{\int_{a_{min}}^{a_{max}} \left( \int_{D_{min}}^{D_{max}} \pi D^2 V(D) E(a, D) N(D) dD \right) m(a) da}{\int_{a_{min}}^{a_{max}} m(a) da} \dots\dots\dots (3)$$

其中, $a$ 、 $D$ 为气溶胶粒子和雨滴直径; $m(a)$ 为对应粒径为 $a$ 的气溶胶粒子的质量密度; $N(D)$ 为直径为 $D$ 的雨

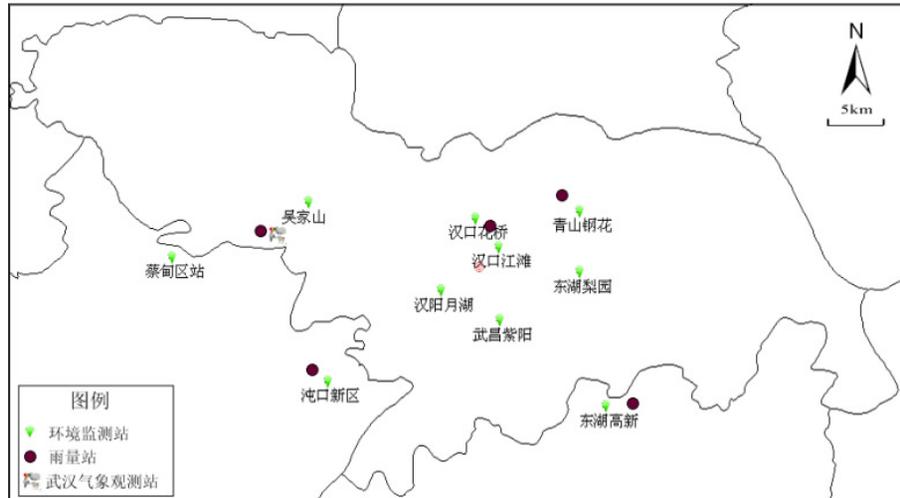


图1 武汉市环境监测站示意图

表1 LNM激光雨滴谱仪的技术参数

| 类别 | 粒径/mm                                       | 流速/(m/s)                             | 雨强/(mm/h) | 降水相态        | 采样时间/min |
|----|---|--------------------------------------|-----------|-------------|----------|
| 测量 | 0.16、0.25、0.375、0.5、0.75、1、1.25、1.5、1.75、2、 | 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1、1.4、1.8、2.2、2.6、 | 0.005~250 | 雨、雪、冰<br>雹等 | 1        |
| 参数 | 2.5、3、3.5、4、4.5、5、5.5、6、6.5、7、7.5、8         | 3、3.4、4.2、5、5.8、6.6、7.4、8.2、9、10     |           |             |          |

滴数密度;  $E(a, D)$  为气溶胶粒子与雨滴碰并系数;  $V(D)$  为雨滴落速, 在本研究计算中主要针对颗粒污染物 PM 处于  $10 \mu\text{m}$  以下的粒子进行计算,  $a_{\min}$  取值为 0,  $a_{\max}$  取值为  $10 \mu\text{m}$ , 分两档进行计算, 雨滴直径分 22 档。

(3) 雨滴数密度随尺度的分布, 通常可采用 Marshall-Palmer 分布<sup>[18]</sup>, 见公式(4)。

$$N(D)dD = N_0 \times e^{-\lambda D} dD \quad N(D)dD = N_0 * e^{-\lambda D} dD \quad \dots (4)$$

其中,  $N_0$  和  $\lambda$  为拟合的 2 个参数。

(4) 气溶胶谱通常用的是 Junge 分布<sup>[19]</sup>, 见公式(5)。

$$n(r)d \log a = \frac{c}{r^n} d \log r \quad n(r)d \log a = \frac{c}{r^n} d \log r \quad \dots (5)$$

其中,  $r$  为气溶胶粒子半径。

(5) 雨滴和粒子碰并系数  $E$ , 见公式(6)。

$$E = \begin{cases} 3 \times \frac{r}{\left(\frac{D}{2}\right)} & 0.1 \mu\text{m} \leq r \leq 1 \mu\text{m} \\ \left[ \frac{stk - \frac{1}{12}}{stk + \frac{7}{12}} \right]^{\frac{3}{2}} & r > 1 \mu\text{m} \end{cases} \quad \dots (6)$$

其中,  $a$  为气溶胶粒子半径,  $stk$  为 Stokes 数,  $D$  为雨滴直径。

## 2 结果与分析

### 2.1 2次重度雾霾天气过程特征分析

“09.26—29”过程武汉地区经历了一次的持续性

空气污染过程, 26日09时AQI指数达到155, 达到重度污染, 首要污染物为颗粒污染物PM, 单站PM<sub>10</sub>小时浓度最高达279  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM<sub>2.5</sub>小时浓度达到149  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。“11.13—24”过程武汉地区经历了一次严重的持续性空气污染过程(过程前期为14—20日, 过程后期21—23日), 空气污染指数自14日0时接近或超过100, 基本达到污染状态, 此后维持在100以上, 23日9时AQI指数达到最大为363, 首要污染物也为颗粒污染物PM, 单站PM<sub>2.5</sub>小时浓度最高达434  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM<sub>10</sub>小时浓度达到381  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2次过程末期开始均出现持续性降水天气, 受冷空气和降水冲刷影响, AQI指数迅速回落, 各污染物浓度显著下降, 污染过程趋向结束。

图2和图3分别给出了2次过程武汉吴家山站点的颗粒污染物PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>浓度变化, 以及吴家山监测站的气态污染物(CO、O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>)质量浓度变化。从图2a可以看出, 颗粒污染物PM<sub>10</sub>基本在200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 附近同步波动, PM<sub>2.5</sub>浓度基本在110  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 附近同步波动, 呈现多峰结构, 而从图3a可看出, 这次污染过程前期(14—20日), 颗粒污染物PM<sub>10</sub>基本在300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 附近同步波动, PM<sub>2.5</sub>浓度基本在150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 附近同步波动, 呈缓慢积累趋势; 过程后期(21—23日), PM<sub>2.5</sub>浓度在22、23日急剧飙升, 呈现2次显著峰值。对比图2b和图3b可看出, 各气态污染物变化趋势差异较大, CO浓度变化与PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>比较一致, “09.26—29”过程最大峰值出现在27日6时2.464  $\text{mg}/\text{m}^3$ , “11.13—24”过程

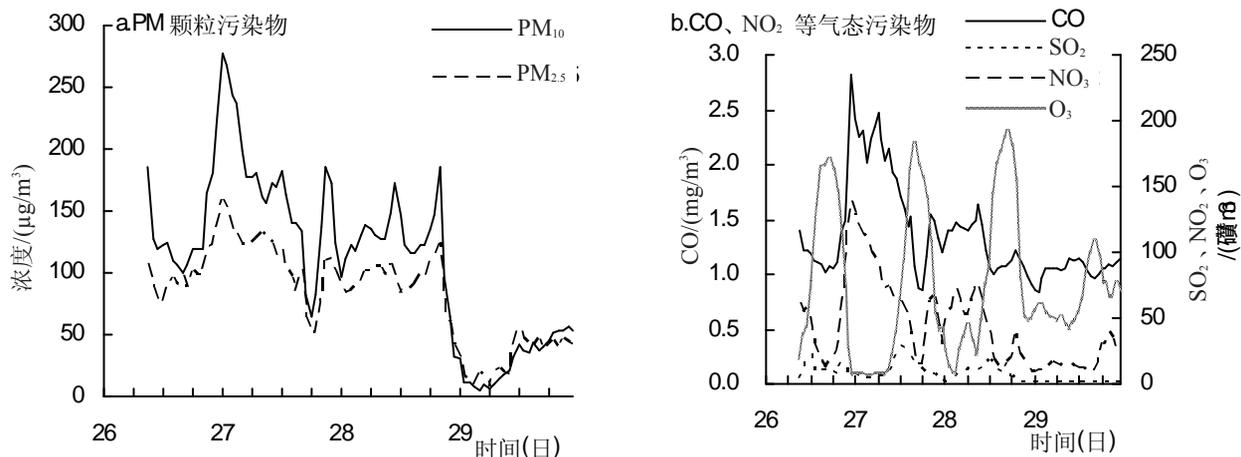


图2 2014年9月26—29日武汉吴家山站污染物浓度逐小时演变

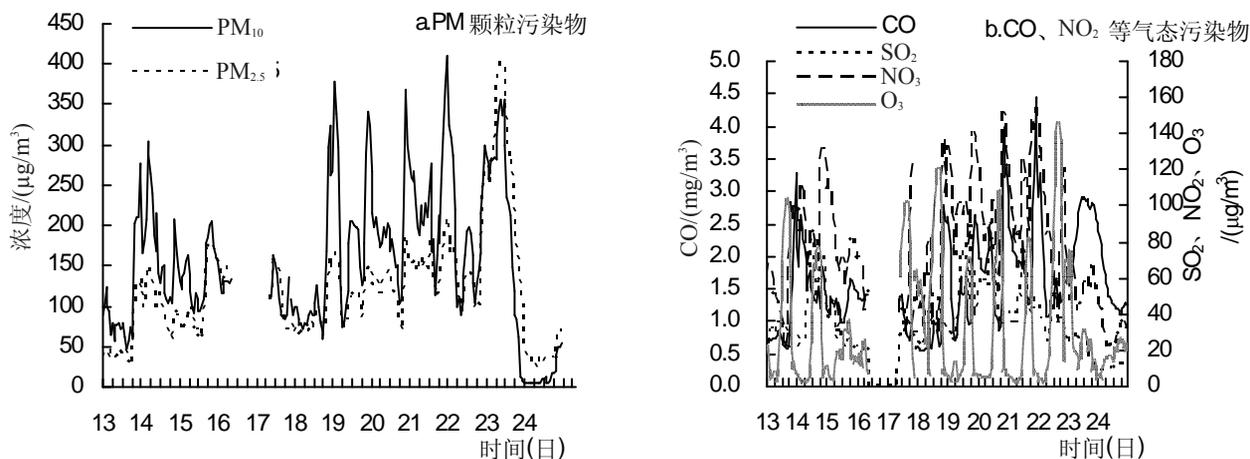


图3 2014年11月13—24日武汉吴家山站污染物浓度逐小时演变

最大峰值出现在21日22时4.44 mg/m<sup>3</sup>, NO<sub>2</sub>浓度变化与PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>也具有较好的正相关性,但浓度峰值出现较PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>早1~2 h,前一次过程分别在26日23时、27日20时和28日9时达到峰值,浓度在75~139 µg/m<sup>3</sup>以上,后一次过程分别在14、17、19、22日20时、21日19时达到峰值,浓度在122 µg/m<sup>3</sup>以上;O<sub>3</sub>是光化学产物,其浓度呈现明显的日变化,SO<sub>2</sub>浓度呈明显无规律的波动。2次过程末期,由于降水的冲刷,PM颗粒污染物和4种气态污染物浓度迅速下降,具体湿清除特征将在2.2中详细讨论。

### 2.2 2次过程湿清除特征对比分析

吴家山站附近的武汉气象观测站是国家级气象站,探测设备种类多,资料齐全,因此分析湿清除特征时采用武汉气象观测站里的降水量、雨滴谱资料等资料。

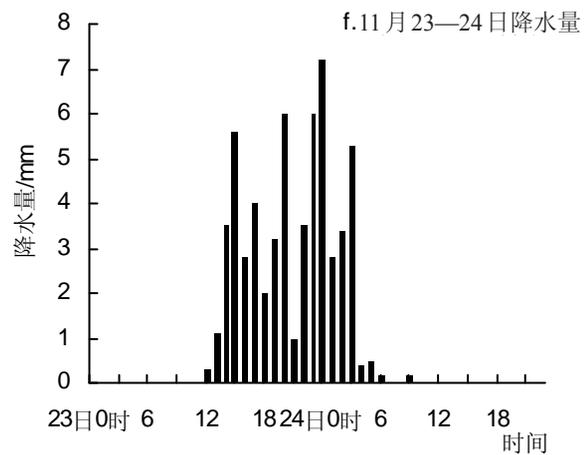
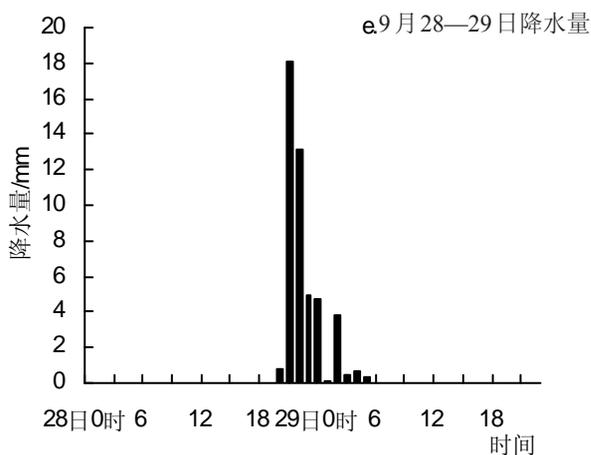
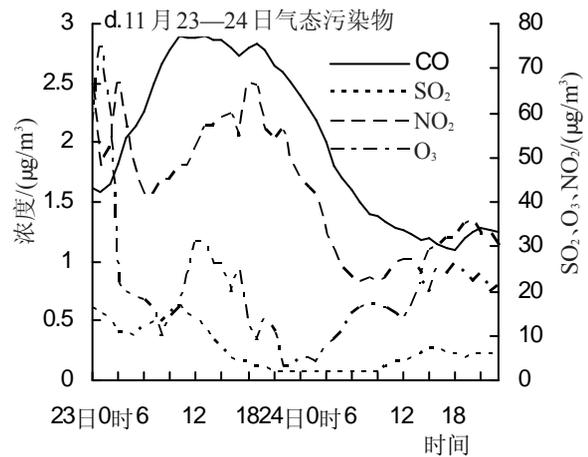
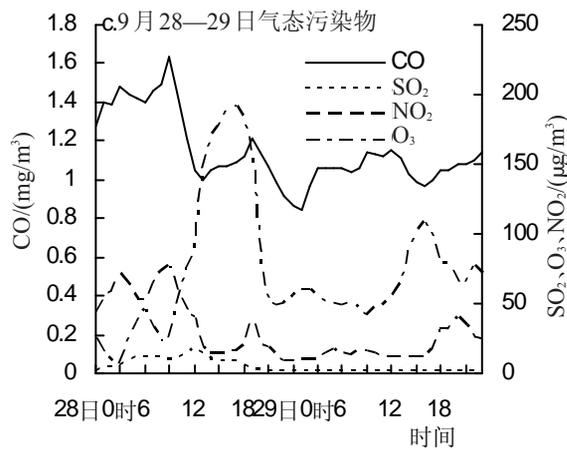
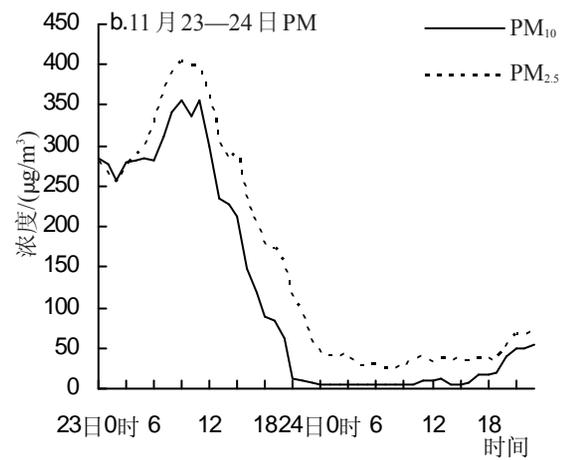
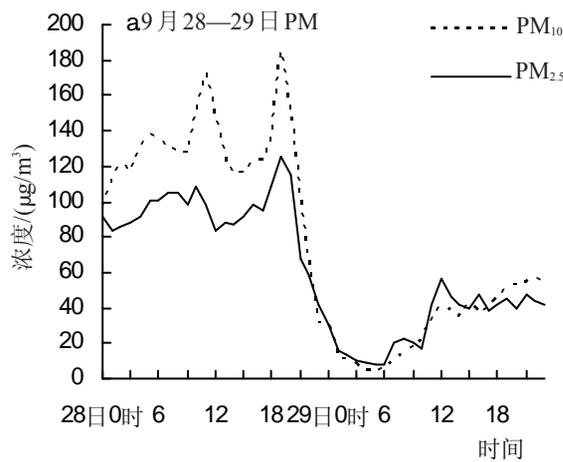
2.2.1 对污染物湿清除特征对比分析 从图4a可以看出“09.26—29”过程的降水时段为28日20时—29日5

时,持续时间10 h,总降水量为47.1 mm,降水强度范围为0.1~18.1 mm/h,呈单峰结构,平均降水强度为4.71 mm/h,从雷达回波可以看出为对流降水(图略),降水期间地面平均风速为3.41 m/s,最大风速为4.3 m/s。PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>随降水持续呈现快速下降趋势,其中PM<sub>10</sub>浓度下降速率超过PM<sub>2.5</sub>,PM<sub>10</sub>从28日17时最高185 µg/m<sup>3</sup>,下降到降水结束时不足8 µg/m<sup>3</sup>,平均下降速率17.7 µg/(m<sup>3</sup>·h),下降幅度为95.7%,而PM<sub>2.5</sub>从28日16时最高125 µg/m<sup>3</sup>,下降到降水结束时不足10 µg/m<sup>3</sup>,平均下降速率为11.5 µg/(m<sup>3</sup>·h),下降幅度为92.0%。CO、O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>浓度也都呈现显著下降趋势,但下降幅度不一,下降幅度分别为30.6%、75%、74%和75%。颗粒污染物PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>和气态污染物O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、CO逐小时平均清除能力分别为17.7 µg/(m<sup>3</sup>·h)、11.5 µg/(m<sup>3</sup>·h)、10.8 µg/(m<sup>3</sup>·h)、2.8 µg/(m<sup>3</sup>·h)、0.6 µg/(m<sup>3</sup>·h)、0.0374 mg/(m<sup>3</sup>·h),另外,也计算了平均1 mm降水对颗粒污染物PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>和气态污染物O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、CO

清除能力分别为  $3.76 \mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{mm})$ 、 $2.44 \mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{mm})$ 、 $2.29 \mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 、 $0.59 \mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{mm})$ 、 $0.13 \mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{mm})$ 、 $0.01 \text{mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{mm})$ 。随着污染物浓度下降,能见度由最低不足  $1 \text{ km}$  快速上升至  $12.1 \text{ km}$ 。

从图4b可以看出“11.13—24”过程的降水时段为23日11时—24日8时,持续时间21 h,其中24日6—7时降水有间歇,总降水量为  $58.8 \text{ mm}$ ,降水强度范围为  $0.2 \sim 7.2 \text{ mm/h}$ ,呈多峰结构,平均降水强度为  $3.1 \text{ mm/h}$ ,

为稳定性层状降水,降水期间地面平均风速为  $2.45 \text{ m/s}$ ,最大风速为  $3.4 \text{ m/s}$ 。 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 随降水持续呈现快速下降趋势,其中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降速率超过 $\text{PM}_{10}$ , $\text{PM}_{2.5}$ 从23日9时最高  $404 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,下降到降水结束时  $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 用了21 h,平均下降速率为  $17.9 \mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ,而 $\text{PM}_{10}$ 从23日9时最高  $357 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,下降到  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下仅用了11 h,降水结束时为  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,平均下降速率  $16.6 \mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 。 $\text{CO}$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 浓度也都呈现显著下降趋势,但下降



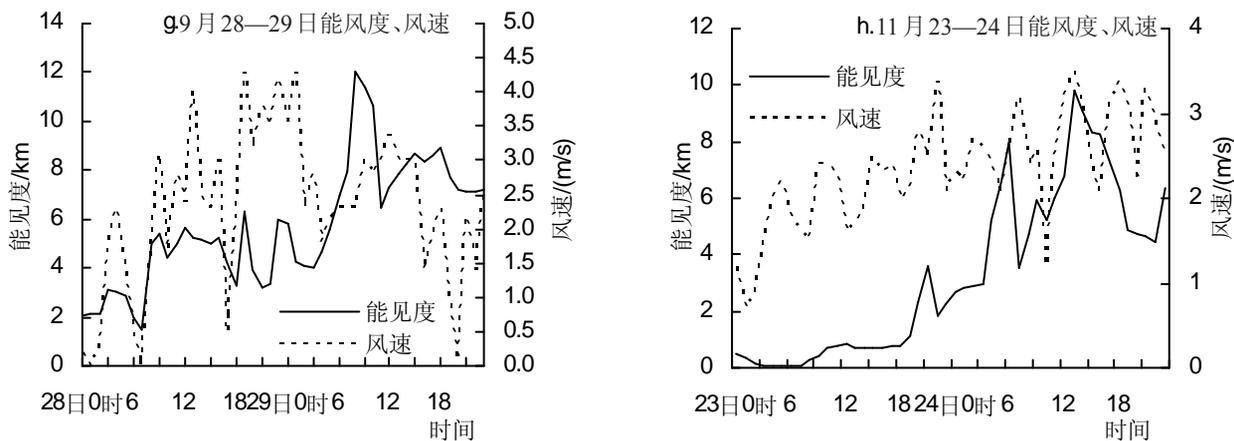


图4 各参数随时间变化图

幅度不一,下降幅度分别为 52.2%、37.5%、54.2%和 66.7%。颗粒污染物 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 和 气态污染物 NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub> 逐小时平均清除能力分别为 17.9 μg/(m<sup>3</sup>·h)、16.6 μg/(m<sup>3</sup>·h)、0.0716 mg/(m<sup>3</sup>·h)、1.3 μg/(m<sup>3</sup>·h)、0.619 μg/(m<sup>3</sup>·h)、0.429 μg/(m<sup>3</sup>·h), 同样,也计算了这次过程平均 1 mm 降水对颗粒污染物 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 和 气态污染物 NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub> 的清除能力分别为 6.39 μg/(m<sup>3</sup>·mm)、5.93 μg/(m<sup>3</sup>·mm)、0.03 mg/(m<sup>3</sup>·mm)、1.3 μg/(m<sup>3</sup>·h)、0.46 μg/(m<sup>3</sup>·mm)、0.15 μg/(m<sup>3</sup>·mm)。明显看到,随着污染物浓度下降,能见度由最低不足 50 m 快速上升至 10.81 km。武汉地区空气质量得到了显著提升,从降水前的严重污染变为优,让武汉市民感觉像进入了天然氧吧一样。

2.2.2 清除率Λ对比分析 为了详细分析各污染物清除率与雨强的关系,采用武汉国家气象观测站实测雨滴谱资料。“09.26—29”这次对流云降水过程获取了 423 个样本,雨滴谱多为单峰结构,随雨强增大雨滴直径和数浓度均相应增大,直径最大达到 5.8 mm,粒子数浓度最大达到 4.6×10<sup>5</sup>个/(mm·m<sup>3</sup>),而“11.13—24”这次层状云降水过程持续时间长,为 21 h,获取了 1157 个样本,雨滴谱多为单峰结构,在 0.25、0.375、0.5、0.75、1.0 mm 均有峰值出现,雨滴直径和数浓度远小于“09.26—29”过程的,直径最大仅为 4.55 mm,粒子数浓度最大仅为 1.86×10<sup>4</sup>个/(mm·m<sup>3</sup>)。分别利用实测雨滴谱资料计算整个污染物的清除率表达式。采用 M-P 分布拟合,得到“09.26—29”过程的平均雨滴谱参数 N<sub>0</sub>=0.096/cm<sup>4</sup>, λ=4.5R<sup>0.25</sup>,与 Marshall 等得到 M-P 分布 (N<sub>0</sub>=0.08/cm<sup>4</sup>, λ=41R<sup>0.21</sup>) 的参数相差甚远,因此用这 423 个样本计算得到整个污染物粒子的清除率Λ和雨强 R 的关系,见公式(7)。

$$A(h^{-1}) = 0.62R^{0.81} \Lambda(h^{-1}) = 0.62R^{0.81} \dots\dots\dots (7)$$

利用上述方法,“11.13—24”过程的平均雨滴谱参数 N<sub>0</sub>=0.04/cm<sup>4</sup>, λ=39.9R<sup>-0.25</sup>,与 Marshall 等得到 M-P 分布的参数相差甚远,武汉这次降水过程 N<sub>0</sub>和 λ 大都低于 Marshall 的 M-P 分布值(N<sub>0</sub>=0.08/cm<sup>4</sup>, λ=41R<sup>0.21</sup>)。因此,用这 1157 个样本计算得到整个污染物粒子的清除率Λ和雨强 R 的关系,见公式(8)。

$$A(h^{-1}) = 0.49R^{0.79} \Lambda(h^{-1}) = 0.49R^{0.79} \dots\dots\dots (8)$$

可见,2 个系数 A、B 与气溶胶谱和雨滴谱、气溶胶粒子的质量密度、雨滴的数密度以及气溶胶粒子和雨滴的碰并系数有关,不同的雨滴谱型对应清除率也不一样。

若不考虑环境因素影响,采用相对固定的碰并系数,Scott 在研究气溶胶粒子的清除率Λ时,采用平均碰并系数 E=0.65 得到 Λ-R 关系式 ( A(h<sup>-1</sup>) = 1.26R<sup>0.78</sup> Λ(h<sup>-1</sup>) = 1.26R<sup>0.78</sup> )<sup>[20]</sup>。将公式(7)和(8)与 Scott 的关系式相比较,在对流云降水情况下,武汉区域的雨滴谱计算得到的污染物粒子清除率的值大约是 Scott 的 0.5。因此,对于武汉地区对流云降水对气溶胶的平均碰并系数可取 Scott 的 0.5 左右,即为 0.33~0.43。在稳定性层云降水情况下,使用武汉区域的雨滴谱计算得到的污染物粒子的清除率值低于本地对流云降水,大约是 Scott 的 0.4。因此,对于武汉地区层状云降水对气溶胶的平均碰并系数可取 Scott 的 0.4 左右,即为 0.25~0.35。通过这 2 次过程碰并系数分析,为数值模式模拟污染物湿清除的参数化过程提供了相关依据。

2.2.3 降水对各气溶胶浓度该变量的拟合对比分析 前述分析中看到,在上述 2 次降水过程中各种污染物浓度呈现不同程度下降,但降水对单种污染物的清除效率是否相同? 各污染物浓度改变量与降水量和气溶胶

浓度大小哪个关系大?

图 6a 和图 6b 对比分析,可以看到“11.13—24”过程各污染物浓度大,降水对其的改变值也大,而“09.26—29”过程的各污染物浓度小,降水影响也相应减弱。因此,降水对各污染物浓度的影响不仅与降水量有关,还与降水前一时次大气的气溶胶浓度相关,公式(1)也说明了这一点。将降水前一时次的气溶胶粒

子浓度和该时次的降水量作为因子,与该时次气溶胶粒子浓度改变量( $\Delta C$ )进行多元回归,见方程(9)。

$$Y(\Delta C)=K_1 \times \text{前一时次浓度} + K_2 \times \text{该时次降水量} + \text{常数} \dots\dots\dots (9)$$

这 2 个过程各个气溶胶粒子浓度的回归方程系数列于表 2。

从表 2 的系数反映出:(1)“09.26—29”对流云降水

表 2 2 次过程气溶胶粒子浓度(Y)的逐步回归方程系数表

| 系数             | “09.26—29”过程气溶胶粒子改变量 |                   |                 |                 |        |                | “11.13—24”过程气溶胶粒子改变量 |                   |                 |                 |        |                |
|----------------|----------------------|-------------------|-----------------|-----------------|--------|----------------|----------------------|-------------------|-----------------|-----------------|--------|----------------|
|                | PM <sub>10</sub>     | PM <sub>2.5</sub> | NO <sub>2</sub> | SO <sub>2</sub> | CO     | O <sub>3</sub> | PM <sub>10</sub>     | PM <sub>2.5</sub> | NO <sub>2</sub> | SO <sub>2</sub> | CO     | O <sub>3</sub> |
| K <sub>1</sub> | -0.141               | -0.225            | -0.574          | -0.56           | -0.294 | -0.746         | -0.098               | -0.067            | 0.381           | -0.161          | 0.144  | -1.451         |
| K <sub>2</sub> | -1.277               | -0.9              | -0.021          | -0.019          | -0.003 | -0.504         | -1.0959              | -2.451            | 0.012           | -0.113          | 0.0002 | -0.03          |
| 常数             | 2.344                | -0.116            | 6.776           | 1.176           | 0.297  | 41.78          | -2.468               | 0.127             | -3.005          | 0.482           | -0.442 | 6.156          |
| 复相关系数          | 0.928                | 0.821             | 0.912           | 0.975           | 0.632  | 0.991          | 0.483                | 0.507             | 0.177           | 0.832           | 0.658  | 0.657          |

过程的气溶胶粒子浓度改变量普遍与上述 2 个因子复相关系数高,其中 SO<sub>2</sub> 的相关程度最高;(2)2 次过程颗粒污染物 PM 的系数绝对值 K<sub>2</sub> 比 K<sub>1</sub> 要大,说明降水对颗粒污染物 PM 的  $\Delta C$  的大小起较大作用,而气态污染物的系数绝对值 K<sub>1</sub> 比 K<sub>2</sub> 要大,说明前一时刻污染物浓度对气态污染物  $\Delta C$  的大小起较大作用;(3)“11.13—24”层状云降水过程的 PM<sub>2.5</sub> 系数 K<sub>2</sub> 的绝对值要大于“09.26—29”对流云降水过程,说明稳定性层云降水对 PM<sub>2.5</sub> 气溶胶粒子清除效果比间断性对流云降水要好。

### 3 结论与讨论

武汉市(113°41—115°05E, 29°58—31°22E)作为长江中游经济发展中心,随着其城市化进程加快,“城市霾岛”效应时有发生,常出现不利于污染物扩散的天气条件。有很多研究表明,降水对清除大气中的污染物质起着重要作用,连续无降水日越多,降水量越小,霾日数也越多,空气污染越严重。岳岩裕等<sup>[21]</sup>对武汉市降水对污染物冲刷作用统计表明随着降水量增大,沉降作用更加突出,空气污染物 PM 浓度呈显著下降趋势。而针对武汉地区持续性空气污染过程特征,降水对武汉地区 PM 颗粒污染物和气态污染物浓度影响的对比研究,不同类型降水(如对流云和层状云降水)对各污染物清除特征等相关研究涉及得很少。

笔者针对上述这些问题进行了详细研究,通过对武汉地区 2 次持续性重度空气污染过程和湿清除特征进行对比分析,目的是了解武汉地区持续性空气污染过程特征,以及降水对武汉地区 PM 颗粒污染物和气态污染物浓度的改变量或湿清除能力,还可以进一步

研究降低污染物浓度等级的降水阈值,为当地空气质量监测预警、数值模式模拟湿清除特征和人工改善空气质量活动提供参考依据。

### 参考文献

- [1] 吴兑,廖碧婷,吴蒙,等.环首都霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件[J].环境科学学报,2014,34(1):1-11.
- [2] 马井会,张国珺,耿福海,等.上海地区一次典型连续浮尘天气过程分析[J].中国环境科学,2013,33(4):584-593.
- [3] 高健,张岳翀,王淑兰,等.北京 2011 年 10 月连续灰霾过程的特征与成因初探[J].环境科学研究,2012,25(11):1201-1207.
- [4] 饶莉,郝汉舟.武汉市 PM<sub>2.5</sub> 的健康损失评价[J].中国农学通报,2016,32(11):161-166.
- [5] 胡向峰,段宇辉,孙玉稳,等.晴空条件下华北平原城市气溶胶观测个例分析[J].中国农学通报,2016,32(11):167-176.
- [6] 孙玉稳,孙霞,银燕,等.华北地区气溶胶数浓度和尺度分布的航测研究——以石家庄为例[J].中国环境科学,2012,32(10):1737-1743.
- [7] 丁一汇,李巧萍,柳艳菊,等.空气污染与气候变化[J].气象,2009,35(3):3-14.
- [8] 王飞,朱彬,康汉清,等.影响南京地区的两次典型空气污染过程分析[J].环境科学,2012,33(10):3647-3655.
- [9] 朱彬,苏继锋,韩志伟,等.秸秆焚烧导致南京及周边地区一次严重空气污染过程的分析[J].中国环境科学,2000,30(5):585-592.
- [10] 洪也,马雁军,王喜全,等.辽宁中部城市群灰霾天气的外来影响——个案分析[J].环境科学学报,2013,33(8):2115-2122.
- [11] 王英,金军,李令军,等.北京市基于 PM<sub>10</sub>/CO 关系的可吸入颗粒物自然源解析[J].环境科学学报,2006,26(7):1203-1208.
- [12] 李霞,杨青,吴彦.乌鲁木齐地区雪和雨对气溶胶湿清除能力的比较研究[J].中国沙漠,2003,23(5):560-564.
- [13] 赵海波,郑楚光.降雨过程中气溶胶湿沉降的数值模拟[J].环境科学学报,2005,25(12):1590-1596.

- [14] 彭红,秦瑜.降水对气溶胶粒子清除的参数化[J].大气科学,1992,16(5):622-630.
- [15] Mircea M, Stefan S. A theoretical study of the microphysical parameterization of the scavenging coefficient as a function of precipitation type and rate[J].Atmospheric Environment,1998,32(17):2931-2938.
- [16] Gao J, Chao FH, Wang T, et al. Particle number size distribution and new particle formation (NPF) in Lanzhou, Western China[J].Paticuology,2011,9(6):611-618.
- [17] Mircea M, Stefan S, Fuzzi S. Precipitation scavenging coefficient : influence of measured aerosol and raindrop size distributions[J]. Atmospheric Environment,2000,34(30):5169-5174.
- [18] Marshall J S, Palmer W M. The distribution of raindrops with size [J].Journal of Meteorology,1948,5:165-166.
- [19] Jung C H, Kim Y P, Lee K W. Analytic solution for polydispersed aerosol dynamics by a wet removal process[J].Journal of Aerosol Science,2002,33(5):753-767.
- [20] Scott, B C. Theoretical estimates of the scavenging coefficient for soluble aerosol particles as a function of precipitation type, rate and altitude[J].Atmospheric Environment,1982,16:1753-1762.
- [21] 岳岩裕,王晓玲,张蒙晰,等.武汉市空气质量状况与气象条件的关系[J].暴雨灾害,2016,35(3):271-278.