Vol. 22, No. 6 Nov. 2017

唐仁茂, 李德俊, 柳草, 等. 2017. 一次重雾霾天气成因及湿清除特征分析 [J]. 气候与环境研究, 22 (6): 699-707. Tang Renmao, Li Dejun, Liu Cao, et al. 2017. Characteristic analysis of a muti-day pollution event and wet removal of aerosols [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (6): 699-707, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16187.

# 一次重雾霾天气成因及湿清除特征分析

唐仁茂1 李德俊2 柳草3 熊洁2 江鸿1

- 1 武汉市气象局, 武汉 430040
- 2 湖北省气象服务中心,武汉 430205
- 3 武汉中心气象台, 武汉 430074

摘 要 为了深入了解发生在武汉地区一次重雾霾天气过程的气象条件、污染源和污染物的湿清除特征,本文利用空气质量监测资料、地面观测资料和遥感火点监测资料和实测雨滴谱资料,详细分析了这次过程。结果表明:此次持续 10~d 的重雾霾天气过程发生在高压天气系统和静风条件下,辐射降温形成的稳定逆温边界层结构有利于污染气溶胶的积累和雾霾的形成和发展,尤其是来自南方持续不断的湿平流使雾霾天气得以长时间持续和发展,整个雾霾天气期间能见度均小于 2~km,最低能见度不足 50~km。2014~k年 11~k9 23~24~k1 日降水过程对此类污染物有明显的清除效果,清除率最高的是颗粒物污染, $NO_2$ 、 $SO_2$  和 CO 次之,最差的是  $O_3$ ,通过与 S Scott (1982) 按平均碰并系数 E(E=0.65) 得到的清除率和雨强的关系比较,武汉地区稳定性降水对气溶胶的平均碰并系数可取 0.25~k0.35。

关键词 雾霾天气 稳定层结 清除率 碰并系数

文章编号 1006-9585 (2017) 06-0699-09

中图分类号 P426

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16187

# Characteristic Analysis of a Muti-Day Pollution Event and Wet Removal of Aerosols

TANG Renmao<sup>1</sup>, LI Dejun<sup>2</sup>, LIU Cao<sup>3</sup>, XIONG Jie<sup>2</sup>, and JIANG Hong<sup>1</sup>

- 1 Wuhan Meteorological Bureau of Hubei Province, Wuhan 430040
- 2 Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430205
- 3 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

**Abstract** Based on an air pollution index, conventional pollution observations, surface meteorological observations and satellite remote sensing data, the relationships between air pollution, large-scale circumfluence and boundary layer meteorology associated with this event were comprehensively analyzed. Additionally, characteristics of wet removal during precipitation were investigated by Laser Precipitation Monitor data. The results showed that: 1) Stable atmospheric stratification and weak winds caused by the steady and uniform high-pressure field contributed to the occurrence, development, maintainability, and reinforcement of the pollution event. The remote transport of pollutants had a significant impact on ambient air quality of Wuhan Area; 2) Wet removal of aerosols occurred during the precipitation

收稿日期 2016-10-13; 网络预出版日期 2017-01-11

作者简介 唐仁茂, 男, 1961年出生,高级工程师,主要从事大气物理和人工影响天气研究工作。E-mail: Tangrmao008@163.com

通讯作者 李德俊, E-mail: esldj@163.com

资助项目 国家重点研发计划 2016YFA0601704、2016YFC0203304,湖北省气象局科技发展基金 2016Y02、2016Q10

**Funded by** National Key Research and Development Program of China (Grants 2016YFA0601704 and 2016YFC0203304), Meteorological Science and Technology Development Fund of Hubei Meteorological Bureau (Grants 2016Y02 and 2016Q10)

event. For example, the washout rate of particle pollutants was the highest, following by that of  $NO_2$ ,  $SO_2$ , and CO, and the washout rate of  $O_3$  was the smallest. By comparing the parameterization of the washout rate with the average scavenging coefficient E (Scott, 1982) and that of Wuhan, it was found the E value was around 0.25 to 0.35 in Wuhan area.

Keywords Fog and haze event, Stable atmospheric stratification, Washout rate, Average scavenging coefficient

# 1 引言

随着经济规模的迅速扩大和城市化进程的加快,近年来我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,雾霾天气显著增多(吴兑等,2007,2014; Xu et al., 2008; Gao et al., 2011, 2012; 朱佳雷等,2011; 高健等,2012; 马井会等,2013),已经引起社会广泛关注。

不同地区空气污染特征、不同雾霾污染过程与 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、近地层逆温和降水量等诸多气象 因子密切相关(王飞等, 2012; Wu et al., 2013; 王丛 梅等, 2013; Li et al., 2014); 部分城市和区域不仅受 局地源的影响,还很大程度上受沙尘暴、秸秆焚烧 等污染物长距离输送的影响(朱彬等, 2010; 洪也等, 2013; Fu et al., 2014; 郭英莲等, 2014)。降水过程 对气溶胶粒子有着显著的湿清除作用,采用清除系 数 $[\Lambda(dp)$ ,表示尺度为 dp 的气溶胶被雨滴所清除的 速率]来研究气溶胶的湿沉降作用已得到广泛的使 用(彭红和秦瑜, 1992; Mircea and Stefan, 1998; Mircea et al., 2000; 赵海波和郑楚光, 2005)。Mircea and Stefan (1998) 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。彭红和秦瑜 (1992) 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,得到了我国两广地区降 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,但主要集中在我国北方和东部发达地区,对我 国中部地区持续性空气污染过程的污染源、与气象 条件之间相互关系及对此类污染物的湿清除特征 还没专门研究过,通过本文研究,可以为本地空气 质量预报和人工改善空气质量活动提供参考依据。

2014年11月14~23日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,过程后期为21~23日),空气污染指数自14日00:00

(北京时间,下同)接近或超过 100,基本达到污染状态,此后维持在 100 以上,23 日 09:00 空气质量指数 (Air Quality Index, AQI)指数达到最大为 363,首要污染物为颗粒污染物,单站细颗粒物 (PM2.5)小时浓度最高达 434 μg m<sup>-3</sup>,直到 23 日 11:00 起出现持续性降水,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。本研究利用空气质量监测、地面气象观测和遥感火点监测等资料对这次空气污染过程的污染源及与气象条件之间相互关系进行了分析,并结合实测雨滴谱等资料分析了此次降水过程对各污染物的湿清除特征。

# 2 资料和方法

本研究所使用的资料包括 2014 年 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/[2014-11-26])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 [2014-11-26]),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,本研究主要摘录了其中 5 个监测子站监测资料(包括 PM2.5、PM10、CO、O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>浓度),分别为青山钢花、汉口花桥、吴家山、沌口新区和东湖高新,5站点位置具体分布情况见图 1,测量 PM2.5、PM10、CO、O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 污染物浓度仪器分别为:METONE1020、RP1400a、TE48I、API400E、TE42I和 TE43I。

气象资料主要是 5 个环境监测子站附近的武汉站观测资料(站点分布见图 1),包括地面观测资料、探空资料、激光雨滴谱等资料,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一次实时测量雨滴谱分布等数据。此外,卫星遥感火点监测资料来自国家卫星气象中心网站(http://nsmc.cma.gov.cn[2014-11-26]);为了追踪这次雾霾过程的污染物来源,选用了驱动 HYSPLIT4 模式的全球同化系统(Global Data Assimilation System,

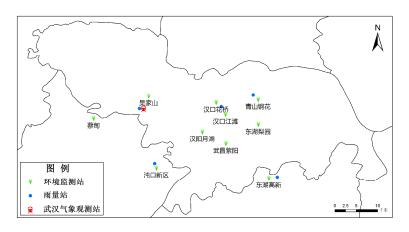


图 1 武汉市环境监测站示意图

Fig. 1 Map of Wuhan metropolitan area and observation sites

GDAS)数据库中气象数据进行后向气流轨迹计算,数据水平分辨率为 2.5° (纬度) ×2.5° (经度),时间分辨率 6 h。本模拟过程轨迹终点设为武汉市(30°N,110°E,具体位置见图 1),预设 500 m、1000 m、1500 m 这 3 个终点高度。

湿清除率 / 采用雨强指数形式来表示:

$$\Lambda = A \cdot R^B, \tag{1}$$

其中,R 为降水强度,A 和 B 为系数,其系数取决于雨滴谱分布 (Marshall and Palmer, 1948)、气溶胶谱分布 (Jung et al., 2002) 和雨滴与气溶胶粒子的碰并系数(Slinn, 1977; Wang et al., 1978)。

# 3 结果和分析

### 3.1 污染气象条件分析

从2014年11月14~23日地面天气图变化可以看出:这次持续性空气污染过程武汉地区均处在高压后部,为持续稳定的均压场,直到过程末期冷锋到达后均压场遭到破坏,伴随着的降水天气污染物浓度迅速下降,污染过程结束。在气象条件中,静小风是造成污染物浓度升高的最重要条件之一(图略)。图 2 给出了 2014年11月13~24日武汉吴家山站 PM2.5浓度与武汉气象站地面风速、风向的变化。从图 2a 可见,过程前期(14~20日)除午后稍大外,其他时刻风速基本小于 2 m/s,与风速相对应,PM2.5浓度在风速较大的午后时可降低,在风速较小的夜间增加,总体呈缓慢累积态势;过程后期(21~23日),地面风速进一步减小,静小风出现的频率增加,风向转换频繁,在静小风条件出现时,

PM2.5 急剧飙升,出现污染峰值。此次雾霾过程能持续10 d之久,主要是由于地面高压系统影响下的稳定层结和静风条件,不利于气溶胶粒子的扩散和雾滴的消散。从图 2b 可见,2014 年 11 月 13~24 日武汉地面风由于受边界层复杂下垫面的影响,风向多变,弱风或静风条件有利于雾霾过程的发展和持续,而不同风向的气流带来干湿性质不同的气团,也是雾霾出现起伏变化的重要因素,19~22 日以偏南气流为主,23 日武汉市空气污染达到最重。

近地层出现逆温不利于污染物的垂直扩散,逆温层的持续时间、强度和厚度对污染物垂直扩散有直接影响。图 3 给出了 2014 年 11 月 14~24 日武汉气象站探空资料分析的温度廓线变化。从图 3 可见,污染过程期间近地层逆温出现频繁,层结稳定。14~23 日出现持续贴地逆温,地面至 300 m 有比较强的逆温,08:00 逆温层高度要高于 20:00 100 m 左右,但 15 日 20:00 300~500 m、19 日 08:00 800~1000 m 又存在一个逆温层,还发现 22 日地面和逆温层顶温度差最高达 6.4 °C,逆温强度大,不利于污染物在垂直方向的扩散,至 23 日 20:00 逆温层强度已大为减弱。

#### 3.2 雾霾过程与污染物浓度变化特征

图 4 给出了 2014 年 11 月 11~24 日吴家山环境 监测站的逐时气态污染物(CO、O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>和 SO<sub>2</sub>) 浓度变化。从图 5 可看出,各气态污染物变化趋势 差异较大: CO 浓度变化与 PM2.5、PM10 比较一致, 过程最大峰值出现在 21 日 22:00(4.44 mg/m³); NO<sub>2</sub> 浓度变化与 PM2.5 也具有较好地正相关性,但浓度 峰值出现较 PM2.5 早 1~3 h,分别在 14 日、17 日、

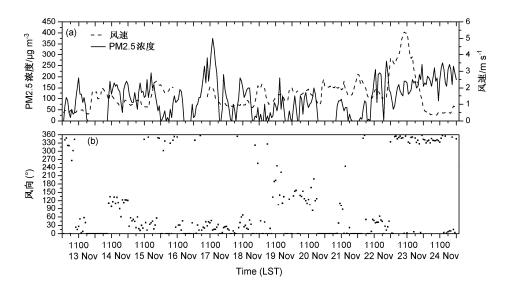


图 2 2014年11月13~24日武汉市(a)PM2.5浓度与地面风速、(b)风向的变化

Fig. 2 Variations of (a) the concentration of PM2.5 and surface wind speed and (b) wind direction during 13-24 Nov 2014 in Wuhan

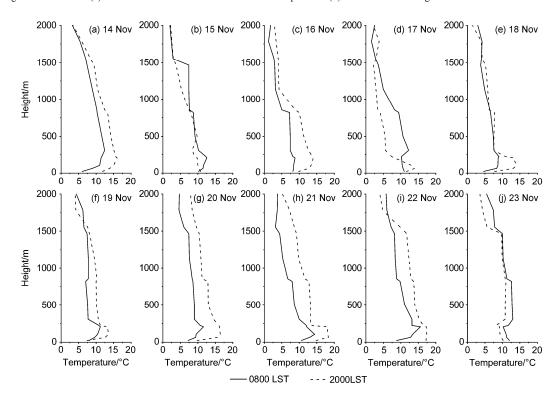


图 3 2014年11月14~23日08:00与20:00武汉站温度廓线

Fig. 3 Temperature profile at 0800 LST and 2000 LST during 14-23 Nov 2014 at Wuhan station

19 日、22 日 20:00、21 日 19:00 达到峰值,浓度在 122 μg/m³以上; O<sub>3</sub> 是光化学产物,其浓度呈现明显的日变化,23 日后由于天气转雨,O<sub>3</sub> 浓度迅速下降并维持低值; SO<sub>2</sub> 浓度呈明显无规律的波动,23 日后由于雨水的冲刷,浓度也迅速下降,具体湿清除特征将在第 4 节中详细讨论。

#### 3.3 污染物来源解析

污染物的高浓度积累除了跟天气系统及气象 条件密切相关以外,还与局地源和污染长距离输送 有关。此次过程污染物主要来源可能并非只有城市 源,湖北周边污染物远距离输送是造成污染的重要 原因。此次污染过程时段在 11 月,正值我国东北

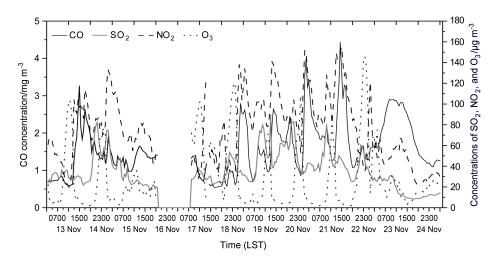


图 4 2014年11月13~24日武汉吴家山环境监测站气态污染物浓度逐小时演变

Fig. 4 Variations of the concentration of vapor pollutants during 13-24 Nov 2014 at Wujianshan observation site, Wuhan

粮仓、华北、江淮和江南收获结束时节,农作物秸秆产生后的就地焚烧会释放大量的大气污染物。据中国气象局卫星气象中心卫星监测(http://www.nsmc.cma.gov.cn/NSMC/UploadFiles/Files/ygyb/ygyb201411.pdf[2014-12-15])分析11月的火点情况,主要分布在黑龙江、吉林、辽宁、河北、山西、安徽、江西、广西和广东等26个省(市),与2013年相比,火点呈明显增加趋势,总数达到2475个火点。东北地区秸秆焚烧产生污染物顺着冷空气南下先后影响河北、山西,加上河北、山西本地秸秆与湖北周边地区秸秆焚烧产生的污染物输送相互叠加,可能是造成此次污染的重要原因。

由于 CO 与 SO<sub>2</sub> 排放量对秸秆焚烧敏感性的巨 大差异,可以用[CO]/[SO<sub>2</sub>]来反映稻秸焚烧的污染 过程及剧烈程度,当[CO]/[SO2]值上升时,说明稻 秸焚烧污染输送在加强,反之则被弱化。图5给出 了 2014 年 11 月 13~24 日武汉市吴家山环境监测 站[CO]/[SO<sub>2</sub>]值和[PM2.5]/[SO<sub>2</sub>]值变化(王英等, 2006)。从图 5 可见, [PM2.5]/[SO<sub>2</sub>]之变化与 [CO]/[SO<sub>2</sub>]变化十分类似,从[CO]/[SO<sub>2</sub>]变化曲线来 看,清洁日比值约为25,可以判定污染物主要来自 城市源:污染过程前期(14~20日)呈现连续波动 状态, 14 日 03:00 达到了峰值为 110.8, 是清洁日 的 4.4 倍; 污染过程后期 (21~23 日), 22 日后 [CO]/[SO<sub>2</sub>]维持在 60 以上, 23 日 09:00 达到最大 104, 主要受秸秆焚烧污染贡献影响; 此外, 23 日 11:00 后比值持续高值还与降水有关, 23~24 日, 武汉及周边区域有一次小到中雨过程,一方面武汉 局地 SO<sub>2</sub>溶于雨水被清除掉,另一方面小雨造成外围地区秸秆的不完全燃烧释放更多的 CO,向武汉区域输送。根据在清洁日和污染过程前、后期的显著差异,集合 CO、SO<sub>2</sub>和 PM2.5 浓度变化情况,参考李令军等(2008)的方法,量化污染过程后期秸秆焚烧污染物的输送贡献可知: 21~23 日秸秆焚烧排放的 CO、PM2.5 输送量可达城市局地排放量的近 3~5 倍,折算成浓度,23 日早上污染物峰值时段污染物输送对武汉市大气 CO、PM2.5 浓度贡献分别约为 2.15 mg/m³ 和 12.05 μg/m³。

图 6 给出了利用后向轨迹模式 HYSPLIT4 结合 GADS 数据库中的相关资料, 计算出 2014 年 11 月 20 日和 23 日 08:00 武汉 (30°N, 114°E) 上空气流 的72h后向输送轨迹。从图6气流的后向输送轨迹 可以确定污染过程前、后期污染气流的来源:污染 过程前期(图 6a), 100 m 高度气流自江淮地区朝 西南方向流向江西再向西北影响武汉,500 m 高度 气流源自江淮地区高层大气,向西南移动到湖南— 江西交界地区后折向西北,缓慢流向武汉,1 km 高 度气流源自江苏南部, 快速移到湖南东北部后北 上,流向武汉上空;污染过程后期(图 6b),不同 高度的气流后向轨迹路径差别较小,分别沿北方的 山西和河北、东北方向的安徽和江苏、东南方向的 江西3个不同地方影响到武汉。还发现污染前期北 部的石家庄和郑州、东部的合肥、东南向的江西提 前武汉 6~7 d 达到中度以上污染,污染后期北部石 家庄和郑州、东部合肥、东南向江西分别提前4、3、 2、1 d 达到重度污染,提前武汉 3、2、1、1 d 达到

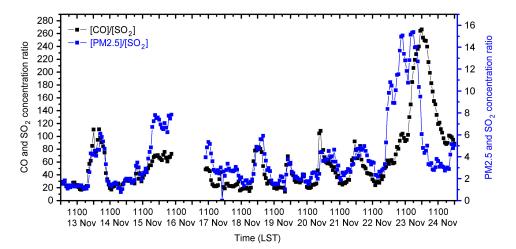


图 5 2014 年 11 月 13~24 日武汉吴家山监测站 CO 和 SO2浓度比值以及 PM2.5 和 SO2浓度比值变化

Fig. 5 Variations of the CO and SO<sub>2</sub> concentration ratio and PM2.5 and SO<sub>2</sub> concentration ratio during 13-24 Nov 2014 at Wujiashan observation site, Wuhan

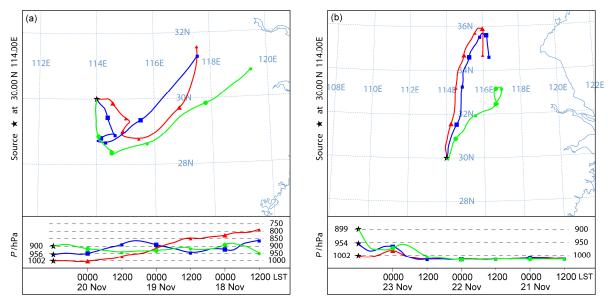


图 6 2014年11月(a)20日、(b)23日武汉上空的72h气流后向输送轨迹

Fig. 6 72-h current backward trajectories over Wuhan on (a) 20 Nov and (b) 23 Nov 2014

#### 严重污染。

2014年11月卫星监测火点主要分布在东北三省、河北、山西、安徽、江西、广西和广东等26个省(市),与去年相比,火点呈明显增加趋势(图7)。结合图6和图7可以看出,过程前期气流流经地区(安徽、江西、湖南),主要从东部和南部远距离输送影响武汉,而过程后期气流流经地区(京津冀、安徽),主要从北部远距离输送影响武汉,与局地污染物相汇聚,在不利于扩散的气象条件下快速积累,造成污染物浓度的急剧飙升。从过程前、后期武汉市污染物浓度变化机制与输送路径可知,污染物长距离输送对武汉区域空气

质量有重要影响。

# 4 湿清除特征分析

从上述分析可以看出,随着输入型污染源影响,吴家山站附近的武汉气象观测站是国家级站,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。

从图 8 可以看出降水时段为 2014 年 11 月 23 日 11:00 至 24 日 08:00,持续时间 21 h,其中 24 日 06:00 至 07:00 降水有间歇,总降水量为 22.0 mm,

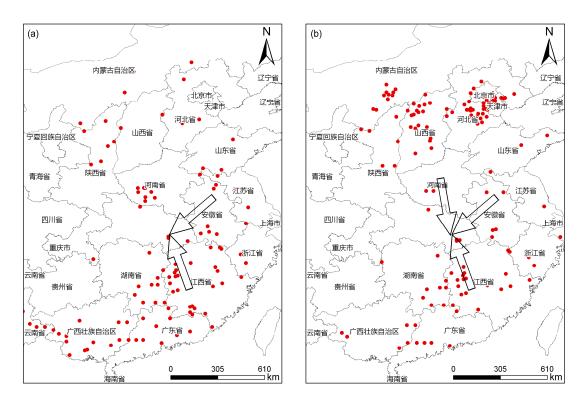


图 7 2014 年 11 月污染过程 (a) 前期 (14~20 日)、(b) 后期 (21~23 日) 卫星遥感火点分布

Fig. 7 FY satellite images of fire spots during (a) earlier (14-20 Nov 2014) and (b) later (21-23 Nov 2014) stages of pollution event

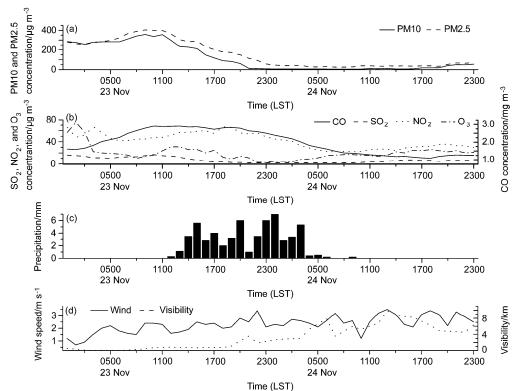


图 8 2014 年 11 月 23 日 00:00 至 24 日 23:00 武汉吴家山站(a)PM10 与 PM2.5 浓度、(b)CO、 $NO_2$  和  $O_3$  浓度及武汉气象观测站(c)逐小时降水量、(d)能见度和风速随时间的变化

Fig. 8 Variations of (a) concentrations of PM10 and PM2.5 and (b) concentrations of CO, NO<sub>2</sub>, and O<sub>3</sub> at Wujiashan station, and (c) hourly precipitation and (d) visibility and wind speed at Wuhan Meteorological Observatory from 0000 LST 23 Nov to 2300 LST 24 Nov 2014

降水强度范围为 0.2~7.2 mm/h, 呈多峰结构, 平均 降水强度为 2.68 mm/h, 为稳定性降水, 降水期间 地面平均风速为 2.45 m/s,最大风速为  $3.4 \text{ m s}^{-1}$ 。 PM10 和 PM2.5 随降水持续呈现快速下降趋势,其 中 PM10 浓度下降速率超过 PM2.5, PM10 逐小时 浓度下降速率为  $2\sim64~\mu g~m^{-3}$ ,从 23~日~09:00~最高357 μg m<sup>-3</sup>, 下降到 8 μg m<sup>-3</sup> 以下仅用了 11 h, 平 均下降速率 31.79  $\mu g \ m^{-3} \ h^{-1}$ ,而 PM2.5 浓度从 23  $\Theta = 09:00$  最高  $404 \, \mu g \, m^{-3}$ ,下降到降水结束时的 28 $\mu g \, m^{-3} \, \Pi \, \overline{J} \, 21 \, h$ ,平均下降速率为 17.9  $\mu g \, m^{-3} \, h^{-1}$ 。 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52.2%、37.5%、 54.2%和 66.7%,整个降水过程期间下降绝对值为 1.504 mg/m³、9 μg/m³、26 μg/m³、13 μg/m³。随着 污染物浓度下降, 能见度由最低不足 50 m 快速上 升至 9.81 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良, 让武汉市民感觉向 进入了天然氧吧一样。

为了详细分析各污染物清除率与雨强的关系,采用实测雨滴谱资料。这次降水过程获取了 1157个样本,雨滴谱多为单峰结构,在 0.25、0.375、0.5、0.75 和 1.0 mm 均有峰值出现,随雨强增大雨滴直径和数浓度均相应增大,直径最大达到 4.55 mm,粒子数浓度最大达到  $1.86\times10^4$  mm $^{-1}$  m $^{-3}$ 。采用 M-P分布拟合,得到了平均雨滴谱参数  $N_0$ =0.04/cm $^4$ 、 $\lambda$ =39.9 $R^{-0.25}$ ,与 Marshall and palmer (1948) 得到 M-P分布的参数相差甚远,武汉这次降水过程  $N_0$  和  $\lambda$  大都低于 Marshall and Palmer (1948) 的 M-P分布值 ( $N_0$ =0.08/cm $^4$ ,  $\lambda$ =41 $R^{-0.21}$ )。于是用这 1157个样本计算得到整个污染物粒子的清除率  $\Lambda$  和雨强 R 的关系为

公式(2)的拟合方差很小,为 0.0385。经过比较,在稳定性降水情况下,武汉区域的雨滴谱计算得到的污染物粒子的清除率值大约是 Scott (1982) 的 0.4,Scott (1982) 是取平均碰并系数 E=0.65 得到  $\Lambda-R$  关系式。因此,对于武汉地区降水对气溶胶的平均碰并系数可取 Scott (1982) 的 0.4 左右,即为  $0.25\sim0.35$ ,这对数值模式在计算湿清除作用过程的参数化提供了依据。

 $\Lambda = 0.49R^{0.79}$ ,

(2)

前述分析中看到,在降水过程中各种污染物浓度呈现不同程度下降,但雨水对单个污染物的清除效率是不是一样的?带着这个疑问,将实测的1157个雨滴谱资料和所得到PM2.5、PM10、CO、O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 浓度资料计算了清除率,并拟合了

清除率和雨强的关系,与前述分析基本一致,降水对颗粒物和易溶于水污染物清除效果比较高。这也有可能与  $O_3$  等是光化学产物,其浓度呈现明显的日变化有关。

## 5 结论

- (1)此次持续 10 d 的重雾霾天气过程发生在高压天气系统和静风条件下,辐射降温形成的稳定逆温边界层结构有利于污染气溶胶的积累和雾霾的形成和发展,尤其是来自南方持续不断的湿平流使雾霾天气得以长时间持续和发展,整个雾霾天气期间能见度均小于 2 km,最低能见度不足 50 m。
- (2) 过程前期( $14\sim20$  日)污染物缓慢积累,过程后期( $21\sim23$  日),PM10、PM2.5、CO、 $NO_2$ 等焚烧特征污染物浓度急剧升高,秸秆焚烧污染物的长距离输送是后期空气污染加重的主要原因。
- (3)火点监测和后向轨迹分析表明,过程前期 气流流经武汉地区东北方向的安徽、江苏与东南方 向江西等地,火点分布较少,后期除了安徽、江苏 和江西等地外,河北、天津、山西等地也向南输送 流经武汉地区,火点分布较多,给本地造成了严重 雾霾天气。
- (4) 11 月 23~24 日降水过程对各污染物出现明显的清除效果,清除率最高的是颗粒污染物 (PM10 和 PM2.5), $NO_2$ 、 $SO_2$ 和 CO 次之,最差的是  $O_3$ ,通过与 Scott (1982) 按平均碰并系数 (0.65) 得到清除率和雨强的关系比较,武汉地区降水对气溶胶的平均碰并系数可取 0.25~0.35。

#### 参考文献 (References)

- Fu X, Wang S X, Cheng Z, et al. 2014. Source, transport and impacts of a heavy dust event in the Yangtze River Delta, China, in 2011 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 14 (3): 1239–1254, doi:10.5194/ acp-14-1239-2014.
- Gao J, Chao F H, Wang T, et al. 2011. Particle number size distribution and new particle formation (NPF) in Lanzhou, Western China [J]. Particuology, 9 (6): 611–618, doi:10.1016/j.partic.2011.06.008.
- Gao J, Chai F H, Wang T, et al. 2012. Particle number size distribution and new particle formation: New characteristics during the special pollution control period in Beijing [J]. Journal of Environmental Sciences, 24 (1): 14–21, doi:10.1016/S1001-0742(11)60725-0.
- 高健, 张岳翀, 王淑兰, 等. 2012. 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, 25 (11): 1201-1207. Gao Jian, Zhang Yuechong, Wang Shulan, et al. 2012. Study on the characteristics

- and formation of a multi-day haze in October 2011 in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 25 (11): 1201–1207.
- 郭英莲, 王继竹, 刘希文. 2014. 武汉地区连续两次严重雾霾天气成因分析 [J]. 高原气象, 33 (5): 1411–1420. Guo Yinglian, Wang Jizhu, Liu Xiwen. 2014. Cause analysis of two continuous serious fog and haze weather in Wuhan area [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33 (5): 1411–1420, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00079.
- 洪也, 马雁军, 王喜全, 等. 2013. 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, 33 (8): 2115-2122. Hong Ye, Ma Yanjun, Wang Xiquan, et al. 2013. External influences in the haze episode in the central city group of Liaoning: A case study [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 33 (8): 2115-2122.
- Jung C H, Kim Y P, Lee K W. 2002. Analytic solution for polydispersed aerosol dynamics by a wet removal process [J]. Journal of Aerosol Science, 33 (5): 753–767, doi:10.1016/S0021-8502(01)00209-9.
- 李令军, 王英, 张强, 等. 2008. 麦秸焚烧对北京市空气质量影响探讨 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 38 (2): 232–242. Li Lingjun, Wang Ying, Zhang Qiang, et al. 2008. Wheat straw burning and its associated impacts on Beijing air quality [J]. Science in China (Ser. D: Earth Sciences), 51 (3): 403–414.
- Li Y L, Deng J J, Mu C, et al. 2014. Vertical distribution of CO<sub>2</sub> in the atmospheric boundary layer: Characteristics and impact of meteorological variables [J]. Atmos. Environ., 91: 110–117, doi:10.1016/j.atmosenv. 2014.03.067.
- 马井会, 张国琏, 耿福海, 等. 2013. 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, 33 (4): 584-593. Ma Jinghui, Zhang Guolian, Geng Fuhai, et al. 2013. Analysis of a typical dust event in Shanghai [J]. China Environmental Science (in Chinese), 33 (4): 584-593, doi:10.3969/j.issn.1000-6923.2013.04.002.
- Marshall J S, Palmer W M. 1948. The distribution of raindrops with size [J]. J. Meteor., 5 (4): 165–166, doi:10.1175/1520-0469(1948)005<0165: TDORWS>2.0.CO:2.
- Mircea M, Stefan S. 1998. A theoretical study of the microphysical parameterization of the scavenging coefficient as a function of precipitation type and rate [J]. Atmos. Environ., 32 (17): 2931–2938, doi:10.1016/S1352-2310(98)00018-1.
- Mircea M, Stefan S, Fuzzi S. 2000. Precipitation scavenging coefficient: Influence of measured aerosol and raindrop size distributions [J]. Atmos. Environ., 34 (29–30): 5169–5174, doi:10.1016/S1352-2310(00)00199-0.
- 彭红,秦瑜. 1992. 降水对气溶胶粒子清除的参数化 [J]. 大气科学, 16 (5): 622-630. Peng Hong, Qin Yu. 1992. The parameterization of the influence of precipitation on the washout of aerosol particles [J]. Scientia Atmospheric Sinica (in Chinese), 16 (5): 622-630, doi:10.3878/j.issn. 1006-9895.1992.05.14.
- Scott B C. 1982. Theoretical estimates of the scavenging coefficient for soluble aerosol particles as a function of precipitation type, rate and altitude [J]. Atmos. Environ., 16 (7): 1753–1762, doi:10.1016/0004-6981 (82)90268-2.
- Slinn W G N. 1977. Some approximations for the wet and dry removal of particles and gases from the atmosphere [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 7 (4): 513–543, doi:10.1007/BF00285550.
- 王丛梅,杨永胜,李永占,等. 2013. 2013年1月河北省中南部严重污染

- 的气象条件及成因分析 [J]. 环境科学研究, 26 (7): 695-702. Wang Congmei, Yang Yongsheng, Li Yongzhan, et al. 2013. Analysis on the meteorological condition and formation mechanism of serious pollution in south Hebei Province in January 2013 [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 26 (7): 695-702.
- 王飞, 朱彬, 康汉清, 等. 2012. 影响南京地区的两次典型空气污染过程分析 [J]. 环境科学, 33 (10): 3647–3655. Wang Fei, Zhu Bin, Kang Hanqing, et al. 2012. Analysis of the impact of two typical air pollution events on the air quality of Nanjing [J]. Chinese Journal of Environmental Science (in Chinese), 33 (10): 3647–3655.
- Wang P K, Grover S N, Pruppacher H R. 1978. On the effect of electric charges on the scavenging of aerosol particles by clouds and small raindrops [J]. J. Atmos. Sci., 35 (9): 1735–1743, doi:10.1175/1520-0469(1978)035<1735:OTEOEC>2.0.CO;2.
- 王英,金军,李令军,等. 2006. 北京市基于 PM10/CO 关系的可吸入颗粒物自然源解析 [J]. 环境科学学报, 26 (7): 1203–1208. Wang Ying, Jin Jun, Li Lingjun, et al. 2006. Analyzing natural source apportionment of PM10 based on the ratio of PM10 to CO in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 26 (7): 1203–1208, doi:10.3321/j.issn:0253-2468.2006.07.026.
- 吴兑, 邓雪娇, 毕雪岩, 等. 2007. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地 区能见度下降 [J]. 热带气象学报, 23 (1): 1–6. Wu Dui, Deng Xuejiao, Bi Xueyan, et al. 2007. Study on the visibility reduction caused by atmospheric haze in Guangzhou area [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (1): 1–6, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2007.01.001.
- 吴兑,廖碧婷,吴蒙,等. 2014. 环首都圈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,34 (1): 1–11. Wu Dui, Liao Biting, Wu Meng, et al. 2014. The long-term trend of haze and fog days and the surface layer transport conditions under haze weather in North China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 34 (1): 1–11.
- Wu M, Wu D, Fan Q, et al. 2013. Observational studies of the meteorological characteristics associated with poor air quality over the Pearl River Delta in China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 13(21): 10755–10766, doi:10.5194/acp-13-10755-2013.
- Xu J, Zhang Y H, Fu J S, et al. 2008. Process analysis of typical summertime ozone episodes over the Beijing area [J]. Science of the Total Environment, 399 (1–3): 147–157, doi:10.1016/j.scitotenv.2008.02.013.
- 赵海波,郑楚光. 2005. 降雨过程中气溶胶湿沉降的数值模拟 [J]. 环境科学学报, 25 (12): 1590–1596. Zhao Haibo, Zheng Chuguang. 2005. Numerical simulation of wet removal of aerosols when raindrop falling [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 25 (12): 1590–1596, doi:10.3321/j.issn:0253-2468.2005.12.004.
- 朱彬, 苏继锋, 韩志伟, 等. 2010. 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, 30 (5): 585-592. Zhu Bin, Su Jifeng, Han Zhiwei, et al. 2010. Analysis of a serious air pollution event resulting from crop residue burning over Nanjing and surrounding regions [J]. China Environmental Science (in Chinese), 30 (5): 585-592.
- 朱佳雷, 王体健, 邢莉, 等. 2011. 江苏省一次重霾污染天气的特征和机理分析 [J]. 中国环境科学, 31 (12): 1943–1950. Zhu Jialei, Wang Tijian, Xing Li, et al. 2011. Analysis on the characteristics and mechanism of a heavy haze episode in Jiangsu Province [J]. China Environmental Science (in Chinese), 31 (12): 1943–1950.