

北京地区不同类型降水对气溶胶粒子的影响

吴进^{1,2}, 孙兆彬^{1*}, 翟亮³, 李琛⁴ (1.中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100081; 2.京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100081; 3.北京市气象台, 北京 100089; 4.北京市气象服务中心, 北京 100089)

摘要: 利用2013~2015年大气成分与气象观测资料,分析了北京地区不同类型降水对气溶胶粒子的影响,结果表明:随着降水强度增大,PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁浓度下降的时次比例、浓度下降比例均增大,PM₁₀下降幅度大于PM_{2.5}和PM₁;不同类型降水对气溶胶浓度影响不同,对流性降水中大气运动剧烈,对3种颗粒物都有快速而显著的清除效果;稳定性降水细分为3类,显著冷空气型的冷空气垂直下沉运动和降水湿清除可使粒子浓度缓慢下降,无显著冷空气但有颗粒物传输型的降水过程对气溶胶粒子的湿沉降效果有限,无显著冷空气无传输型气溶胶粒子吸湿增长可能导致粒子浓度不会下降;降雪或雨夹雪过程中随着降雪强度增大,气溶胶粒子浓度下降比例增大,但下降时次比例呈指数或者对数变化.雨雪相态转换的降水过程更为复杂,除了上述因素之外,还需考虑雨雪相态转变带来的水滴(雪)粒径、降水粒子对周边气流的动力拖曳作用的变化、冷空气下沉运动对流型的改变.

关键词: 对流性和稳定性降水; 降雪或雨夹雪; 大气运动; 湿清除; 气溶胶; 粒径

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2018)03-0812-10

Effects of different types of precipitation on aerosol particles in Beijing. WU Jin^{1,2}, SUN Zhao-bin^{1*}, ZHAI Liang³, LI Chen⁴ (1.Institute of Beijing Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 2.Beijing-Tianjin-Hebei Prediction and Early Warning Center for Environmental Meteorology, Beijing 100081, China; 3.Beijing Municipal Weather Forecast Center, Beijing 100089, China; 4.Beijing Meteorological Service Center, Beijing 100089, China). *China Environmental Science*, 2018,38(3): 812~821

Abstract: Based on the environmental and meteorological data during 2013~2015, the influence of different types of precipitation on aerosol particles was analyzed. The results showed that with the increasing rainfall precipitation, the concentration decrease ratio and mean of PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ increased. PM₁₀ declined more than PM_{2.5} and PM₁. Different types of precipitation led to different effect on aerosol concentration. To the convective precipitation, atmospheric motion was fierce, which had a rapid and significant effect on scavenging of particles with different diameters. Stable rainfall was subdivided into three categories. To significant cold air type, the descending motion and wet scavenging may make particles concentration decreased slowly. To no-significant cold air and transmission type, the wet scavenging of stability weak precipitation could be neglected. To no-significant cold air and no-transmission type, rapid air humidification which made aerosol particle hygroscopic growth may lead to the concentration of particles not decreased. In snow or sleet process, with snowfall intensity increased, aerosol particle concentration decreased ratio increased. The ratio of the decrease was exponential and logarithmic. The precipitation process with snow and snow phase transition was more complicated. Besides the above factors, it was necessary to consider the influence of the change of the water droplet (snow) size caused by the change of snow phase phase, the dynamic drag action of precipitation particles on the surrounding air, the cold air subsidence movement and the change of flow situation type.

Key words: convection and stability precipitation; snow and sleet; atmospheric motion; wet scavenging; particles; particle sizes

收稿日期: 2017-08-25

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(8161004,8172051);北京市科技计划课题(Z151100002115045);国家自然科学基金青年项目(41605110);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(IUMKY201724)

* 责任作者, 副研究员, zbsun@ium.cn

近年来京津冀地区已成为我国气溶胶污染最为严重的地区^[1].在空气重污染过程中,如何有效降低气溶胶浓度已是当今社会关注的热点之一.冬季强冷空气伴随的大风由于源地清洁且能快速提升大气容量,能在较短时间内净化空气,但仅多发于冬半年,此外降水等天气现象可降低气溶胶浓度,即湿沉降清除.大气湿沉降是大气污染物从源到汇的重要环节,降水粒子通过惯性碰并等作用将云底下的干气溶胶粒子带走;另一方面,气溶胶粒子作为凝结核先变为云滴,再由成百万个云滴结合成降水粒子而下落.本文仅对云层下部即降水过程中对颗粒物的清除开展研究.

目前不同类型降水过程对气溶胶颗粒的清除作用大小,至今还没有统一论.已有研究表明,降雨过程对粗粒子和细粒子均有去除作用,对细粒子的去除作用尤为明显^[2],降雪对粒径小于 $0.03\mu\text{m}$ 的气溶胶粒子的清除能力较强^[3],同时降水对气溶胶碱性化学组分冲刷效果尤为显著,且湿沉降作用对降水化学组成产生了重要影响^[4-11];但是,也有研究表明,降水对清除气溶胶粗粒子和改善大气能见度作用明显,但降雨前后细粒子数浓度变化不大,甚至有所升高^[12-13].同时,一些学者将降水的湿沉降作用剥离出来进行量化^[14],利用斯托克斯数 Stk 分析了不同粒径雨滴对颗粒物的惯性碰并作用,这一研究是在假定大气稳定,空气中的粒子静止不动的前提下,运动气流中的粒子被静止障碍物(雨滴被假设为一球体)所捕获,气流速度等于雨滴的末速度.另外,早在 1967 年 Friedlandev 就利用雷诺数和贝克来数来讨论雨滴对气溶胶粒子的捕获效率,并得到了捕获效率就是扩散到雨滴上的粒子数与下落雨滴所扫出体积重包含的粒子数之比.以上假设和理论对于理解气溶胶粒子运动及降水对气溶胶粒子的清除效率具有重要意义,但以上所描述的对气溶胶粒子的清除作用可能与真实大气相距甚远,在大气层结相对稳定的条件下,以上理论可能能够解释实际大气的部分问题,但当大气层结不稳定的条件下,用以上理论分析降水过程则与实际结果相距甚远.

总体看来,以上研究结论说明降水对不同粒径粒子的影响效果不一,尤其对细颗粒物的去除作用仍有很大争议.在实际大气中,一次完整的降水过程中气溶胶浓度变化是大气运动和降水湿清除等多种因素的综合结果,在云下空气中,不仅包含雨滴对气溶胶粒子的“惯性碰并”等,同时,大气在降水过程中的垂直和水平动力条件对气溶胶粒子也具有很大的影响.以往的研究多重视降水量级、雨滴谱、雨滴的惯性碰并作用等,而对降水天气中与之相伴的大气动力机制有所忽视,不同类型的降水天气可导致虽具有相同的降水量级,但对气溶胶粒子却产生完全迥异的清除效果.所以,本文为深入研究真实大气中降水过程对气溶胶粒子的影响,从不同降水的性质(稳定性、对流性)及降水量级角度出发,将降水湿沉降与大气动力条件有机结合,更全面阐释气溶胶粒子降水前后浓度变化机制.

1 材料与方法

选取北京市气象局大气成分观测站朝阳 ($39^{\circ}57'\text{N}$, $116^{\circ}30'\text{E}$)、昌平 ($40^{\circ}13'\text{N}$, $116^{\circ}13'\text{E}$) PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 质量浓度逐时监测数据(图 1),数据时间长度为 2013 年 1 月 1 日~2015 年 12 月 31 日,两个测站均采用 GRIMM180 环境颗粒物监测仪.同时,还使用京津冀地区国控大气环境监测站的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度逐时监测数据,其中北京有 12 站,天津 15 站,河北 53 站 (<http://www.cnemc.cn/>).气象资料来源于人工观测和地面自动气象观测数据, NCEP($1^{\circ}\times 1^{\circ}$)再分析逐 6 小时气象资料.风廓线雷达分别位于北京市代表站北京市观象台($39^{\circ}48'\text{N}$, $116^{\circ}28'\text{E}$,简称观象台)、海淀($39^{\circ}59'\text{N}$, $116^{\circ}17'\text{E}$)(图 1),两部雷达均为频率 1270~1375MHz、探测高度 10km 的 L 波段低对流层风廓线雷达,探测数据的垂直分辨率 120m,共分 59 层,时间分辨率为 6min.地面风场采用流线形式显示.海淀雨滴谱仪 HSC-OTT Parsivel EF 是由北京华创维想公司与德国 OTT 公司联合开发的基于现代激光技术的光学测量仪器,液态降水类型粒径的测量范围为 0.2~5mm,固态降水类型粒径测量范围为 0.2~25mm,可对

速度为 0.2~20m/s 的降水粒子进行测量.气象数据均通过北京市气象局信息中心质控后使用.文中无特殊说明均为北京时.

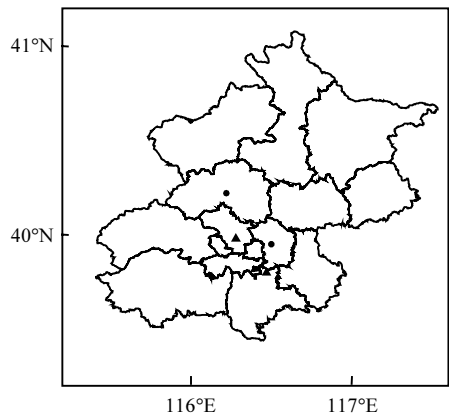


图 1 观象台、海淀、朝阳、昌平气象观测站位置

Fig.1 Location of Beijing meteorological observatory, Haidian, Chaoyang, Changping meteorological observation
▲观象台、海淀,●朝阳、昌平

2 降水过程中不同粒径颗粒物的浓度变化

对朝阳、昌平站 2013~2015 年平均 2036 个降水时次进行了详细统计(表 1),分析 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 浓度变化.利用降水前后浓度对比,反映的应是降水湿沉降和大气动力耦合的共同结果.分析表明,随着降水雨强(1h 降水量)增大,3 种粒径颗粒物下降时次比例、浓度下降比例均有所增大,粗颗粒物(PM₁₀)的下降幅度大于细颗粒物(PM_{2.5}、PM₁);当雨强 0~1mm/h 时,PM₁₀ 浓度上升 582 个时次,占总样本 45%,PM_{2.5} 浓度上升 691 个时次,占总样本 51%,PM₁ 浓度上升 677 个时次,占总样本 52%.降水过程对不同粒径的颗粒物清除效果不明显,尤其 PM_{2.5} 和 PM₁ 浓度超过 50%的时次都不降反升,且浓度上升比例显著大于 PM₁₀;当雨强≥10mm/h 时,PM₁₀ 下降时次占总样本 71%,浓度平均下降 35%,PM_{2.5} 下降时次占总样本 70%,浓度平均下降 32%,PM₁ 下降占总样本 67%,浓度平均下降 31%.降水过程对不同粒径的颗粒物清除效果明显,对粗颗粒物的清除效果尤为显著.总体上,结论与已有研

究结果基本一致^[15-16].虽然雨强增大时对颗粒物的清除作用增强,但即使雨强≥10mm/h,仍有 28%~33%的时次不同粒径颗粒物浓度上升,且相同雨强下,颗粒物浓度时而下降时而上升,这与降水的类型和天气系统的特点密不可分,所以还需进一步分析降水性质及对应的大气垂直和水平动力作用.

表 1 不同雨强下 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 浓度变化
Table 1 Concentrations variations of PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ under various rainfall intensity

颗粒物	小时雨强	样本数(个)		比例(%)		浓度上	浓度下
		升	降	升	降	升(%)	降(%)
PM ₁₀	0~1mm	582	707	45	55	15	-15
	1~5mm	156	256	38	62	19	-20
	5~10mm	29	42	41	59	24	-31
	≥10mm	14	34	29	71	24	-35
PM _{2.5}	0~1mm	691	665	51	49	13	-13
	1~5mm	187	245	43	57	17	-18
	5~10mm	26	46	36	64	14	-25
	≥10mm	14	32	30	70	15	-32
PM ₁	0~1mm	677	618	52	48	14	-12
	1~5mm	188	225	46	54	16	-17
	5~10mm	27	44	38	62	23	-25
	≥10mm	16	32	33	67	16	-31

3 不同类型降水过程对气溶胶粒子的影响

2013~2015 年共计降水 151 次,根据降水类型进行分类,其中对流性降水(降水伴有雷电、冰雹、雷暴大风、短时强降水等强对流性天气)114 次,样本时次 1177 个;稳定性降水 37 次,样本时次 499 个;雨夹雪及降雪过程 14 次,样本时次 360 个.

3.1 对流性降水过程

通过对 1177 个对流性降水样本时次进行统计,结果显示(表 2),随着雨强增大,PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 下降时次比例、浓度下降比例都显著增大,结论与表 1 相似,但 3 种粒子浓度下降比例增幅更大.

以 2014 年 6 月 6 日一次典型对流性降水为例,在 12:00~13:00 小时降水量最大的时段中,PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 浓度分别从 73、60、40μg/m³ 快速降至 10μg/m³ 以下(图 2).

表2 对流性降水不同雨强下PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁浓度变化
Table 2 Concentrations variations of PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ under various rainfall intensity of convective rainfall

颗粒物	小时雨强	样本数(个)		比例(%)		浓度上		浓度下
		升	降	升	降	升(%)	降(%)	
PM ₁₀	0~1mm	287	329	47	53	17		-15
	1~5mm	110	177	38	62	19		-23
	5~10mm	28	38	42	58	24		-33
	≥10mm	14	34	29	71	24		-35
PM _{2.5}	0~1mm	347	333	51	49	15		-14
	1~5mm	136	173	44	56	18		-21
	5~10mm	25	42	37	62	14		-26
	≥10mm	14	32	30	70	15		-32
PM ₁	0~1mm	323	299	52	48	16		-13
	1~5mm	131	155	45	54	18		-21
	5~10mm	26	40	39	61	25		-26
	≥10mm	16	32	33	67	16		-31

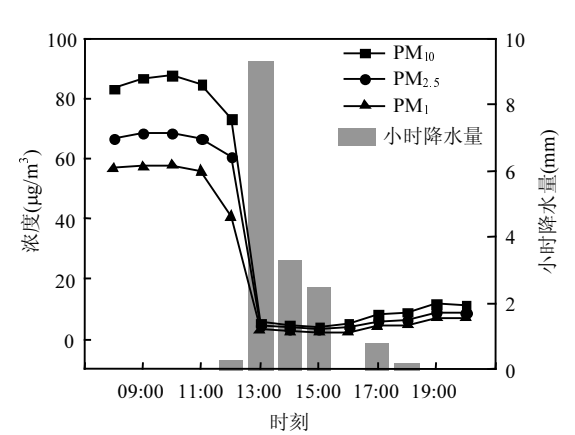


图2 朝阳站2014年6月6日PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁浓度和降水量
Fig.2 PM₁₀ PM_{2.5} PM₁ concentrations and precipitation of Chaoyang on Jun. 6, 2014

强对流天气发生过程中,大气运动极为剧烈.图3是用2014年6月6日12:00的观象台地面温度订正了8:00的温度压力对数图(又称探空图),灰色阴影代表CAPE(大气不稳定能量)的大小,阴影越大则不稳定能量越大.本次降水前CAPE达1327J/kg,14:00前后700~500hPa出现最大值为0.42m/s的上升运动,而天气学中天气尺度系统的上升运动量级为10⁻²m/s,0.42m/s已接近中小尺度系统的上升量级(10⁰m/s),故大气垂

直方向上强上升运动极有利于气溶胶粒子的扩散和稀释^[17];与此同时,13:00前后地面还出现了雷暴大风天气,雷暴大风^[18]一旦产生不仅短时间内在大气垂直方向上下沉运动剧烈,本个例中最大下沉速度达7m/s以上,远超出了天气尺度垂直运动的量级(图4),同时,水平风速突增,13:00朝阳地区水平风速达8~10m/s(图5),即5级风力.总体上,该次降水发生过程中强上升与中小尺度的强下沉运动共存,大气运动剧烈,极有利于气溶胶粒子的扩散和清除,故在1h甚至更短时间内对不同粒径的颗粒物都有快速而显著的清除效果.王莉莉等^[19]通过分析天气型表明槽或槽前降水常使区域环境质量达到谷值,为清除天气型.而该类降水大气多为不稳定状态.

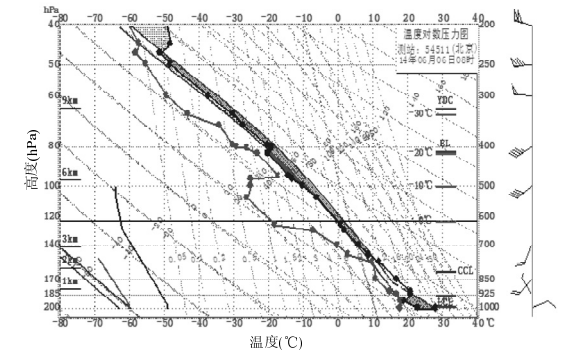


图3 北京市观象台2014年6月6日探空图
Fig.3 Temperature logarithmic pressure diagram of Beijing Meteorological Observation on Jun. 6, 2014

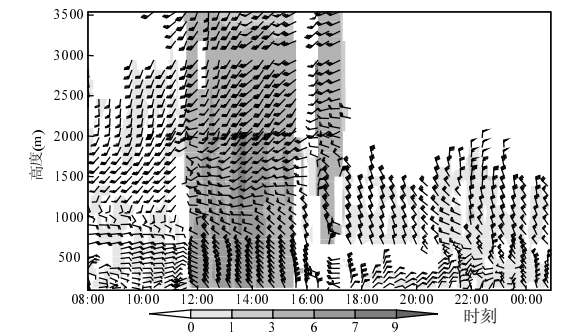


图4 2014年6月6日观象台风廓线风场和下沉速度
Fig.4 Wind profiles and sinking speed of Beijing Meteorological Observatory on Jun. 6, 2014

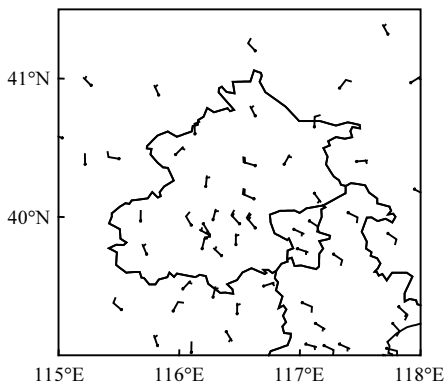


图5 北京地区 2014 年 6 月 6 日 13:00 地面风场
Fig.5 Beijing surface wind at 13:00 on Jun. 6, 2014

3.2 稳定性降水过程

非对流性(稳定性)降水雨强较小,统计时段内未有雨强>10mm/h 的个例.499 个降水时次中(表 3),随着雨强增大,PM₁₀ 下降时次和浓度下降比例呈增大趋势,而 PM_{2.5}、PM₁ 虽然下降时次比呈增大趋势,但浓度下降比例在 1~5mm/h 时基本无变化,>5mm/h 呈减小趋势,说明在稳定性降水中细颗粒物浓度变化较为复杂.当降水过程中大气运动不剧烈时,细颗粒物浓度变化与多种因素有关,如降水前空气质量^[20]、冷空气强度、区域传输、气溶胶吸湿增长等条件.根据细颗粒物变化情况,再将稳定性降水分为显著冷空气型、无显著冷空气有传输型、无显著冷空气无传输型.

表 3 稳定性降水不同雨强下 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 浓度变化
Table 3 Concentrations variations of PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ under various rainfall intensity of steady rainfall

颗粒物	小时雨强	样本数(个)		比例(%)		浓度上升(%)	浓度下降(%)
		升	降	升	降		
PM ₁₀	0~1mm	123	190	39	60	14	-15
	1~5mm	50	91	35	65	17	-16
	5~10mm	2	6	25	75	14	-18
PM _{2.5}	0~1mm	149	163	47	52	11	-12
	1~5mm	63	77	45	55	11	-12
	5~10mm	2	6	25	75	12	-10
PM ₁	0~1mm	161	153	51	49	12	-12
	1~5mm	68	72	48	51	09	-12
	5~10mm	3	5	38	62	09	-05

3.2.1 显著冷空气型稳定性降水

图 6 为 2015 年 3 月 31 日一次稳定性降水,此次过程雨强均在 4mm/h 以内,未出现对流性天气现象.降水期间 08:00~13:00 3 种粒径的粒子浓度变化缓慢,PM_{2.5}、PM₁ 在 09:00~10:00 雨强最大时段未出现显著下降,11:00 之后 3 种粒径粒子均缓慢下降,14:00PM_{2.5}、PM₁ 浓度回落至 100μg/m³ 以下.

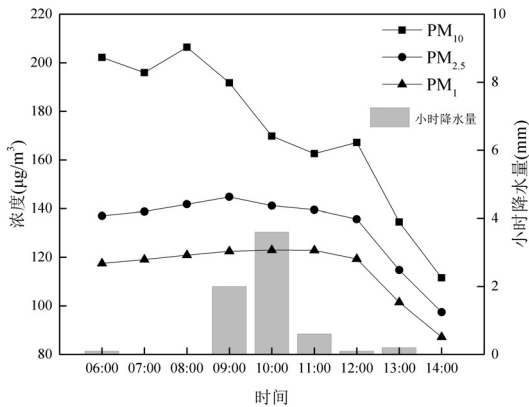


图 6 朝阳站 2015 年 3 月 31 日 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 浓度和降水量
Fig.6 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ concentrations and precipitation of Chaoyang on Mar. 31, 2015

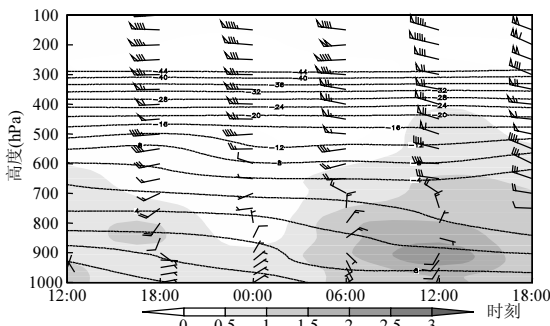


图 7 2015 年 3 月 30~31 日 NCEP 再分析资料垂直分布
Fig.7 NCEP reanalysis data profile on Mar. 30~31, 2015
时间为世界时,阴影部分为垂直速度(Pa/s),虚线为温度(℃)

该次降水过程中,天气尺度上升运动较弱,但弱冷空气活动清晰,从 31 日 08:00 高度为 850hPa 的 8℃ 等温线不断下降(图 7),说明低层有冷平流影响,冷空气的下沉运动从最大雨强出现后的 11:00 开始逐渐加强,最强出现在 20:00,与 3 种粒径的气溶胶粒子开始缓慢下降的时间段相同,且

粒子浓度下降幅度增大时段(11:00~14:00)与下沉运动加强时段一致;期间地面风场一直维持 2~3m/s 的偏东风.粒子浓度下降时段与冷空气下沉增强时段基本一致.综合看来,冷空气的垂直下沉运动与降水清除作用共同导致 3 种粒径粒子浓度缓慢下降.

3.2.2 无显著冷空气有传输型稳定性降水 北京地区大气污染过程中颗粒物浓度迅速增长大多与对流层底层西南风或东南风的区域输送密切相关^[21-25].图 8 为 2015 年 2 月 20 日一次稳定性降水过程,该降水 23:00 前为小雨,之后转为雨夹雪或雪.从 13:00 开始 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 浓度一直呈陡升趋势,同时从 100μg/m³ 以下上升至 170μg/m³ 以上,19:00~23:00 降水期间 3 种粒径的气溶胶粒子浓度仍快速上升.

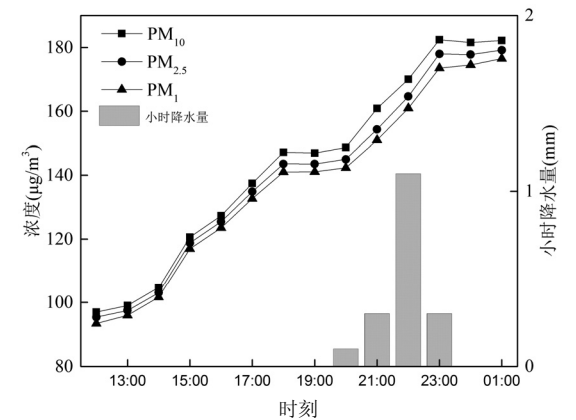


图 8 朝阳站 2015 年 2 月 20~21 日 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 浓度和降水量

Fig.8 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ concentrations and precipitation of Chaoyang on Feb. 20~21, 2015

20 日 13:00 京津冀 PM_{2.5} 浓度分布呈南高北低模态,PM_{2.5} 浓度高值区位于河北邯郸一带(图略),随着对流层底层南风流场维持,21:00PM_{2.5} 浓度高值区北推至河北中部太行山沿山一带,北京地区的 PM_{2.5} 浓度随之显著升高(图 9).后向轨迹分析表明(图 10),地面 10m、500m 气团来源于北京以南地区,500m 移速略大于 10m,1000m 气团来自高空下沉,进一步验证了北京地区近地面污染物来源于河北中部区域输送,而降水对气溶胶

的湿沉降作用远远小于气溶胶区域输送作用.所以,当在区域重污染背景下有明显污染物输送的稳定性降水过程中,弱降水的湿沉降作用基本可被忽略,而且因地面水汽和雨滴在空气中蒸发会增加空气中的相对湿度,颗粒物吸湿度增长,在雨滴和颗粒物共同消光作用下能见度进一步降低.

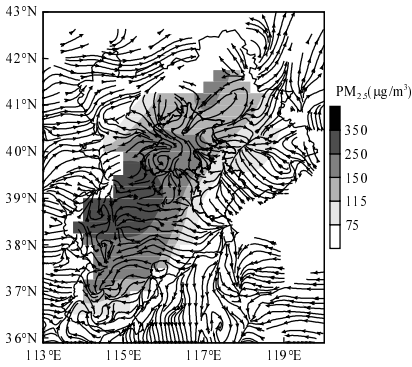


图 9 京津冀地区 2015 年 2 月 20 日 21:00 PM_{2.5} 浓度和流场

Fig.9 PM_{2.5} concentration and flow field of Beijing Tianjin Hebei region at 00:00BST on Feb. 21, 2015

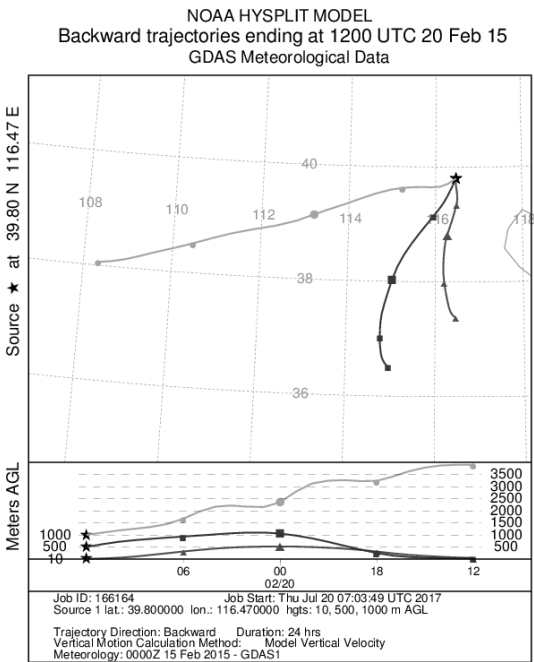


图 10 北京地区 2015 年 2 月 19 日 20:00~20 日 20:00 后向轨迹分布

Fig.10 Backward trajectory direction of Beijing from 20:00 BST 19 to 20:00 BST 20 Feb. 2015

3.2.3 无显著冷空气无传输型稳定性降水 此类降水过程中气溶胶粒子浓度变化机制较为复杂,为重污染天气预报的难点之一.本文提出几种可能机制.图 11 为 2014 年 5 月 24 日一次稳定性降水,雨势平缓,未伴随对流性天气现象.4:00~12:00 降水期间,除 5:00~6:00 小时雨强大于 5mm 时,3 种粒径粒子浓度略有下降之外,其他时段基本稳定维持或略有上升,其中 6:00~8:00 上升幅度较大.

京津冀地面流场显示(图 12),6:00~8:00 北京盛行偏东气流,但风速不大,上游 $PM_{2.5}$ 浓度较北京略低.但在湿偏东气流影响下,北京的相对湿度在 2:00~6:00 升高了 50%(图 13),露点升高了 3.3℃,说明北京地区的绝对水汽含量大幅上升,且 8:00~9:00 相对湿度略有下降的同时气溶胶粒子浓度也略有下降,二者变化趋势接近,故推断气团快速增湿导致气溶胶粒子吸湿增长可能是粒子浓度上升的气象原因.5:00~6:00 小时雨强大于 5mm/h 时气溶胶粒子浓度略有下降,考虑可能与雨滴湿沉降作用有关.当不存在明显区域输送,大气垂直和水平运动并不剧烈的条件下,降水湿沉降作用可能有所凸显,影响规律基本遵循本研究第二部分的统计结果,但与此同时,近地面湿度的增大又对气溶胶粒子吸湿增长有正贡献,此类过程中气溶胶粒子浓度上升还是下降的不确定性较大.

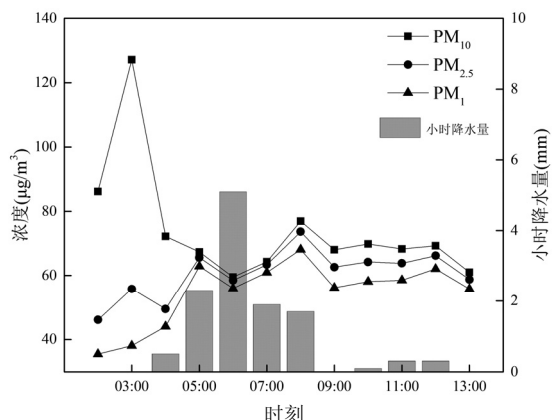


图 11 朝阳站 2014 年 5 月 24 日 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_1 浓度和降水量

Fig.11 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_1 concentrations and precipitation of Chaoyang on May 24, 2014

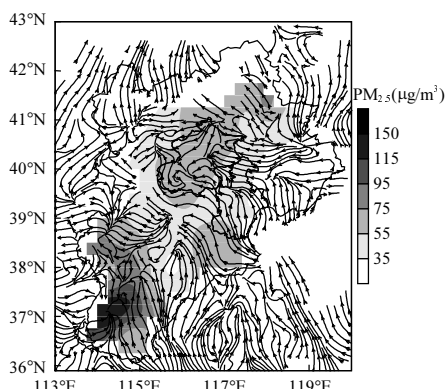


图 12 京津冀地区 2014 年 5 月 24 日 06:00 $PM_{2.5}$ 浓度和流场

Fig.12 $PM_{2.5}$ concentration and flow field of Beijing Tianjin Hebei region at 06:00 BST on May 24, 2014

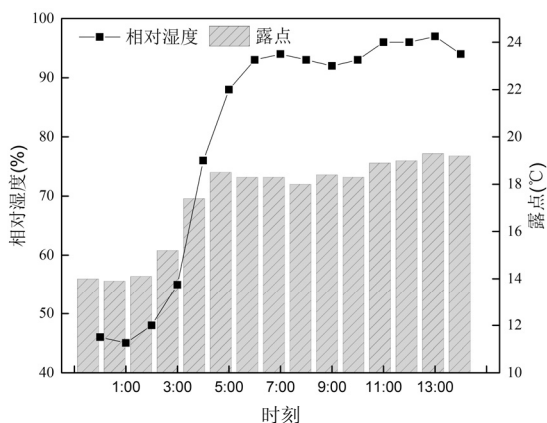


图 13 朝阳站 2014 年 5 月 24 日露点和相对湿度

Fig.13 Dew point and relative humidity of Chaoyang on May 24, 2014

3.3 降雪或雨夹雪过程

通过统计降雪或雨夹雪 360 个时段(表 4)显示,随着小时降雪量增大,3 种粒径的粒子浓度下降百分比都呈增大趋势,但浓度下降时次百分比呈抛物线变化,1~2mm 时下降时次百分比最大,随着降雪量增大或者减小,下降时次百分比均上升.

以 2013 年 2 月 3 日中雪过程为例,小时降雪量均小于 1mm,降雪期间 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_1 浓度呈上升趋势(图 14).降雪期间无明显冷空气影响,对流层中低层垂直温度梯度小,925hPa 维持 -4℃左右,且无强烈垂直运动(图 15).气溶胶粒子的浓度变化受降雪湿清除影响较小,主要是由于

区域传输以及气溶胶内部因素等影响.

表 4 降雪或雨夹雪过程中 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 浓度变化
Table 4 Concentrations variations of PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁
under various snow intensity

颗粒物	小时 雪强	样本数(个)		比例(%)		浓度上 升(%)	浓度下 降(%)
		升	降	升	降		
PM ₁₀	0~1mm	147	147	50	50	13	-13
	1~2mm	11	21	34	66	18	-16
	≥2mm m	2	2	50	50	11	-20
PM _{2.5}	0~1mm	164	132	55	44	12	-11
	1~2mm	10	22	31	69	18	-16
	≥2mm	2	2	50	50	13	-19
PM ₁	0~1mm	166	128	56	43	11	-10
	1~2mm	8	23	25	72	16	-16
	≥2mm m	2	2	50	50	13	-19

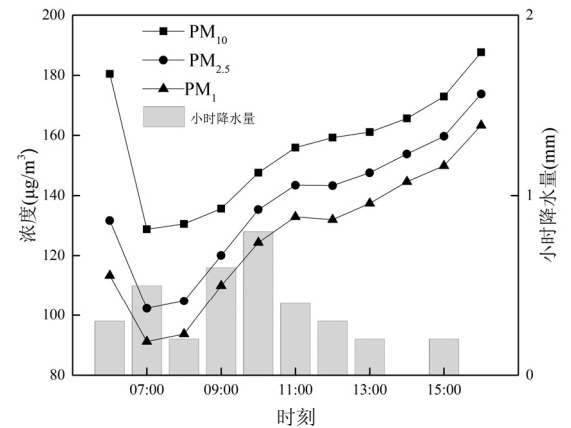


图 14 朝阳站 2013 年 2 月 3 日 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 浓度和降雪量

Fig.14 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ concentrations and snowfall of Chaoyang on Feb. 3, 2013

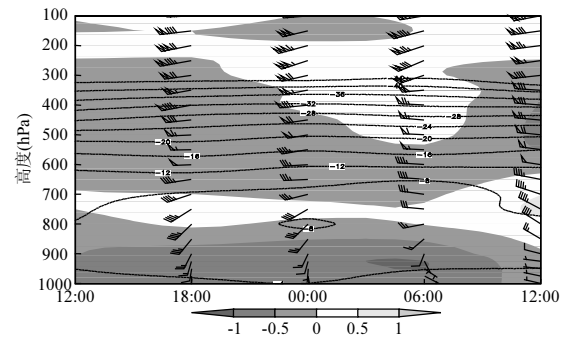


图 15 2013 年 2 月 2~3 日 NCEP 再分析资料垂直分布
Fig.15 NCEP reanalysis data profile on Feb. 2~3, 2013

世界时,阴影部分为垂直速度 Pa/s,虚线为温度,高度单位 hPa

4 讨论

上述几类降水都发生在同一相态下,水滴相态并未发生改变.但当发生雨雪相态转变后,雨滴粒径也将发生变化,这类降水对气溶胶粒子的影响机制更为复杂.2016 年 11 月 20~21 日北京出现初雪过程(图 16),20 日以稳定性小雨为主,16:00~23:00 3 种粒径气溶胶粒子浓度从 60~120μg/m³ 逐渐下降至 20μg/m³;22:00~24:00 转为雨夹雪后继而转为雪,21 日以降雪为主,0:00~4:00 降雪期间除了 PM_{1.0} 外,PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度有所上升.

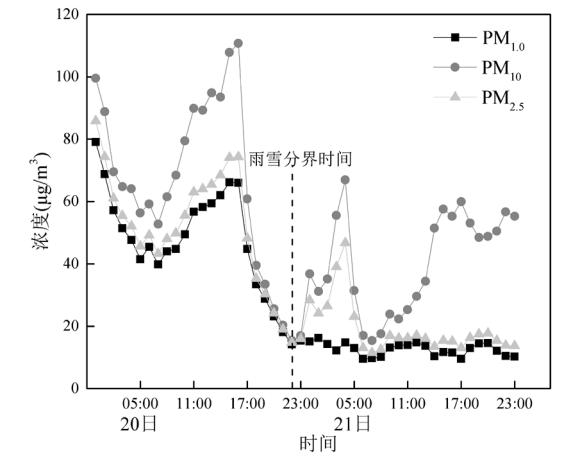


图 16 2016 年 11 月 20~21 日 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 浓度
Fig.16 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ concentrations variations on Nov. 20~21, 2016

如图 17 所示,17(a)、(b)、(c)为降雨过程,(d)、(e)、(f)为雨转雪的过程,降水粒子粒径明显增大.对于使用斯托克斯数(Stk)来讨论雨滴对颗粒物的清除作用,Stk 正比于 U/R , U 为降水粒子的末速度, R 为降水粒子的半径.Twomey^[26]提出当降水粒子的半径超过 40μm 时,就会明显偏离斯托克斯定律,当 Stk=1 时,粒子均能被有效捕获,而斯托克斯数很小的粒子捕获效率很低甚至不能被捕获.20~21 日雨雪期间无论其中哪个阶段在惯性捕获颗粒物的过程中 U/R 的比值都非常小,对小粒径颗粒物捕获效率很低.但是实际上真实大气中的颗粒物浓度出现两次明显下降,尤其是在 20 日 16:00~23:00 降水粒子的粒径接近 1000μm 时,PM₁ 浓度也出现了明显下降.Twomey^[26]认为

对于小雨滴来说,流型呈粘滞性,当雨滴半径接近或者超过 $1000\mu\text{m}$ 时,流型逐渐变为湍流性,因此 U/R 随半径增加而减少被由于流型改变而造成的更有效捕获所弥补,由降水粒子拖曳和大气冷空气混合在一起形成下沉运动(图略)与以上提到的由于流型改变所形成的捕获效应一起降低

了大气中颗粒物的浓度,而仅仅用斯托克斯数的相关讨论来指导大气中降水天气对污染物清除是不妥当的.降水和降雪粒子对周边空气的动力拖曳,配合系统冷空气的动力作用对流型的改变,将给用斯托克斯数来讨论降水过程对颗粒物的清除效果带来极大障碍.

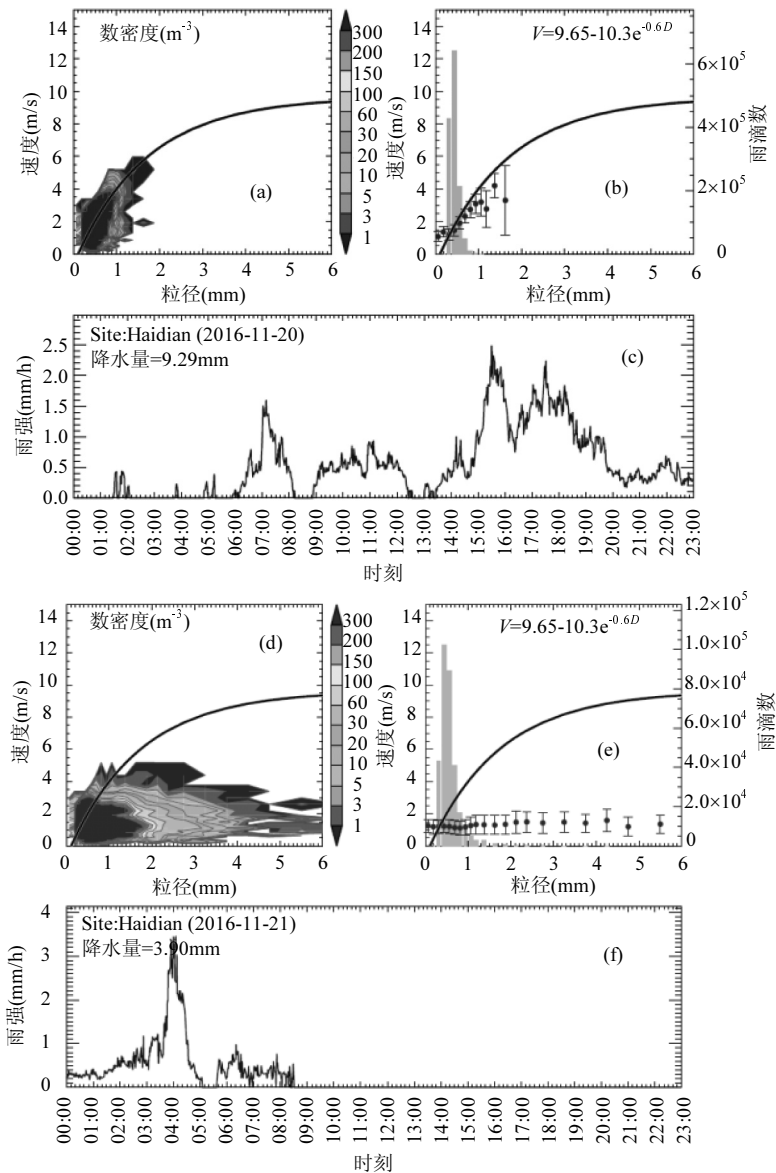


图 17 雨滴谱仪监测的降水粒子粒径变化

Fig.17 Variation of precipitation particle size during rainfall monitoring by HSC-OTT Parsivel

(a)、(b)、(e) 2016 年 11 月 20 日, (d)、(e)、(f) 2016 年 11 月 21 日

另外,气溶胶中包含着大量彼此相互作用着的粒子,在湍流、空气动力、布朗运动、电学、漂移及其他因素作用下,粒子间产生相对运动,彼此接触及凝聚.通过凝聚,粒子能从一种尺度范围

快速转化为另一种很不相同的尺度范围^[26]。需要说明的是,气溶胶中粒子的运动十分复杂,本研究并非对气溶胶粒子的相关规律面面俱到,仅从不同降水类型的大气动力机制和湿清除作用为切入点来研究降水对气溶胶粒子的影响。但在具体降水过程中,尤其是大气复合型重污染天气下,应针对气象条件和大气物理化学等因素综合考虑。

5 结论

5.1 通过对 2013~2015 年观测数据统计显示,随着降水雨强增大,PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 3 种粒径粒子下降时次比例、浓度下降比例均有所增大,但 PM₁₀ 的下降幅度大于 PM_{2.5} 和 PM₁。当雨强 0~1mm/h 时,PM_{2.5}、PM₁ 上升比例均显著大于 PM₁₀;当雨强 ≥10mm/h 时,降水过程对不同粒径的颗粒物清除效果明显,对粗颗粒物去除效果尤为显著。

5.2 对流性降水由于大气运动剧烈,不同粒径的颗粒物浓度能在短时间内迅速降低,且随着雨强增大,下降时次比例和浓度下降比例越大。

5.3 显著冷空气型稳定性降水可使 3 种粒径粒子浓度缓慢下降;无显著冷空气有传输型稳定性降水对气溶胶粒子的湿沉降作用基本可忽略,以传输作用为主;无显著冷空气无传输型稳定性降水的气溶胶粒子浓度变化机制较为复杂,本研究提出几种可能机制,气团快速增湿时气溶胶粒子吸湿增长可能导致粒子浓度不会下降。

5.4 降雪或雨夹雪过程随着降雪强度增大,气溶胶浓度下降比例增大,但下降时次比例呈指数或对数变化,降雪量在 1~2mm/h 下降时次比例最大。

5.5 雨雪相态转换的降水过程更为复杂,除了上述因素之外,还需考虑雨雪相态转变带来的水滴(雪)粒径、降水粒子拖曳和冷空气下沉运动与流型改变的影响。

参考文献:

- [1] Zhao P S, Dong F, Yang Y D, et al. Characteristics of carbonaceous aerosol in the region of Beijing' Tianjin' and Hebei' China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013,71:389-398.
- [2] 胡 敏,刘 尚,吴志军,等.北京夏季高温高湿和降水过程对大气颗粒物谱分布的影响 [J]. *环境科学*, 2006,27(11):2293-2298.
- [3] 康汉青,朱 彬,樊曙先.南京北郊冬季大气气溶胶及其湿清除特征研究 [J]. *气候与环境研究*, 2009,14(5):523-530.

- [4] 韩 燕,徐 虹,毕晓辉,等.降水对颗粒物的冲刷作用及其对雨水化学的影响 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(2):193-200.
- [5] 吴玉霞,沈志来,黄美元.重庆地区降水对气溶胶浓度及雨水中离子浓度的影响 [J]. *高原气象*, 1991,10(1):52-60.
- [6] 李金香,李 峰.北京市一次沙尘过程中降水化学组分的监测分析 [J]. *中国环境科学*, 2012,32(12):2149-2154.
- [7] 马 琳,杜建飞,闫丽丽,等.崇明东滩湿地降水化学特征及来源解析 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(11):1768-1775.
- [8] 韩力慧,张海亮,张 鹏,等.北京市春夏季降水及其对大气环境的影响研究 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(6):2047-2054.
- [9] 金 蕾,徐 谦,林安国,等.北京市近二十年(1987~2004)湿沉降特征变化趋势分析 [J]. *环境科学学报*, 2006,26(7):1195-1202.
- [10] 杨懂艳,李秀金,陈圆圆,等.北京市湿沉降特征分析 [J]. *环境科学*, 2011,32(7):1867-1873.
- [11] Yao X H, Chan C K, Fang M, et al. The water-soluble ionic composition of PM_{2.5} in Shanghai and Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002,36:4223-4234.
- [12] 姚 青,韩素芹,蔡子颖.天津一次持续低能见度事件的影响因素分析 [J]. *气象*, 2012,38(6):688-694.
- [13] 苏 捷,赵普生,陈一娜.地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究 [J]. *环境科学*, 2016,37(4):1208-1218.
- [14] 董 群,赵普生,陈一娜.降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力 [J]. *环境科学*, 2016,(10):3686-3692.
- [15] 王 瑛,朱 彬,康汉青,等.气溶胶云下清除理论及观测研究 [J]. *中国科学院大学学报*, 2014,31(3):306-313,321.
- [16] 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):18-24.
- [17] 孙兆彬,廖晓农,王占山,等.北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM_{2.5} 清除作用 [J]. *环境科学*, 2016,37(10):3679-3685.
- [18] 王莉莉,王跃思,王迎红,等.北京夏末秋初不同天气形势对大气污染物浓度的影响. *中国环境科学*, 2010,30(7):924-930.
- [19] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. *天气学原理和方法* [M]. 北京:气象出版社, 2000:458.
- [20] 韩力慧,张海亮,张 鹏,等.北京市春夏季降水及其对大气环境的影响研究. *中国环境科学*, 2017,37(6):2047-2054.
- [21] 徐祥德,周 丽,周秀骥,等.城市环境大气重污染过程周边源影响域 [J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2004,34(10):958-966.
- [22] 吴 兑,廖国莲,邓雪娇,等.珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究 [J]. *应用气象学报*, 2008,19(1):1-9.
- [23] 王莉莉,王跃思,王迎红,等.北京夏末秋初不同天气形势对大气污染物浓度的影响 [J]. *中国环境科学*, 2010,30(7):924-930.
- [24] Hanna S R, Ramsdell J V, Cramer H E. Urban Gaussian diffusion parameters. Modeling the urban boundary layer [C]. Boston: American Meteorological Society, 1987:337-379.
- [25] 吴 兑,廖碧婷,吴 蒙,等.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*, 2014,34(1):1-11.
- [26] Twomey S. *大气气溶胶* [M]. 北京:科学出版社, 1984.

致谢: 本文雨滴谱数据处理及应用是由北京旗云创科科技有限责任公司王永博士协助完成,在此表示感谢。

作者简介: 吴 进(1984-),女,新疆五家渠人,工程师,硕士,主要从事大气环境相关的工作.发表论文 6 篇。