ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第37卷 第10期
2016年10月15日

目 次

降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力

董群[1,2], 赵普生[2,3*], 陈一娜[3,4]

(1. 中国气象科学研究院, 北京　100081; 2. 中国气象局北京城市气象研究所, 北京　100089; 3. 京津冀环境气象预报预警中心, 北京　100089; 4. 南开大学环境科学与工程学院, 天津　300071)

摘要: 利用与惯性碰撞紧密相关的斯托克斯数 Stk 计算公式,结合海淀宝联大气成分站和海淀自动观测站 2012 年 10 月 ~ 2014 年 10 月两年实测的逐时 $PM_{2.5}$ 浓度数据和对应时刻的气象要素数据,并挑选典型降水过程分析降水对不同粒径气溶胶的碰撞清除作用. 惯性碰撞是降水对气溶胶的最主要清除方式,斯托克斯数 Stk 的计算结果显示,降水对粒径小于 2 μm 的气溶胶的直接碰撞清除作用很小,对粒径大于 2 μm 的粗粒子的清除作用相对较大; 实际观测数据统计分析表明,$PM_{2.5}$ 浓度明显减少的降水过程及降水时次很少,而 43.2% 的降水时次 $PM_{2.5}$ 浓度有所升高; 通过对典型降水过程气溶胶粒径分布数据分析表明,降水对爱根核模态(< 0.1 μm)和粗模态气溶胶(> 1.0 μm)有明显的清除作用,但对积聚模态清除作用不明显,由于 $PM_{2.5}$ 的质量浓度主要分布在积聚模态,因此,降水对环境中 $PM_{2.5}$ 的碰撞清除作用很弱.

关键词: $PM_{2.5}$; 湿清除; 惯性碰撞; 斯托克斯数; 粒径分布

中图分类号: X513　**文献标识码**: A　**文章编号**: 0250-3301(2016)10-3686-07　**DOI**: 10.13227/j.hjkx.2016.10.002

Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes

DONG Qun[1,2], ZHAO Pu-sheng[2,3*], CHEN Yi-na[3,4]

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 3. Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089, China; 4. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The impact of collision removal of rainfall on aerosol particles of different sizes was analyzed through the calculation of Stokes number, combining with the hourly $PM_{2.5}$ concentrations and meteorological data in Haidian from October 2012 to October 2014, and also the size distribution data in a selected rainfall process. The calculation results of Stokes number showed that the raindrops had little effect on direct collision removal of aerosol particles of smaller than 2 μm, and had more effect on aerosol particles of larger than 2 μm. Based on the statistical analysis of the observation data, the precipitation processes or the precipitation hours with significantly decreased $PM_{2.5}$ were quite limited. However, $PM_{2.5}$ concentrations were increased in 43.2% of the precipitation hours. By analyzing the size distribution data of aerosol particles during a typical precipitation process, we found that the precipitation had significant scavenging effect on Aitken mode particles (< 0.1 μm) and coarse mode particles (> 1.0 μm), except for the accumulation mode particles. Since the accumulation mode aerosols contributed most of the mass of $PM_{2.5}$, the rainfall processes only had minor influence on the collision scavenging of $PM_{2.5}$.

Key words: $PM_{2.5}$; wet scavenging; inertial collision; Stokes number; size distribution

近年来,以细颗粒物($PM_{2.5}$)为代表的气溶胶污染严重,对人体健康及区域能见度等造成了巨大危害,其中京津冀区域是我国气溶胶污染最严重的地区[1~5]. 气溶胶污染日益受到政府和社会的广泛关注,在重污染过程中如何有效降低气溶胶浓度水平是热点之一,当前很多部门希望通过人工降雨,往空中喷洒水雾等措施来净化空气,达到降低污染的目的. 但是降水过程本身对气溶胶具体清除作用有多大,对哪些粒径的气溶胶有明显清除作用,目前还缺乏系统的分析和普遍共识.

湿清除作为大气中气溶胶粒子的主要清除机制,维持着大气中气溶胶粒子源、汇之间的平衡,是大气自净最重要的过程之一. 大气气溶胶粒子的湿清除是指气溶胶粒子被大气凝结体清除并最终降落到地面的自然过程. 包括云内清除和云下清除两个阶段. 其中,云下清除是指云下的气溶胶粒子在雨滴(或其他降水粒子)降落过程中,主要通过惯性碰并过程和布朗扩散作用,捕获气溶胶粒子,使之从大气中清除的过程.

有学者利用气溶胶数据,结合常规气象观测数据和大气能见度等,通过降雨前后气溶胶数浓度和

收稿日期: 2016-04-18; **修订日期**: 2016-05-17
基金项目: 北京市科技新星计划项目(Z131109000413002, xx2013002); 北京市优秀人才培养资助项目(2014000021223ZK49); 北京市科技计划项目(Z131100006113013); 北京市自然科学基金项目(8131003)
作者简介: 董群(1991 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为中小尺度城市气象和气溶胶理化特征,E-mail: daqidongq@163.com
* 通讯联系人,E-mail: pszhao@ium.cn

质量浓度的变化情况，直接分析降雨对气溶胶的清除作用[6~9]．但在实际的降雨过程中，气溶胶质量浓度或数浓度的变化是气团变化和降水湿清除等因素的综合结果，即降雨过程对气溶胶的清除不仅是雨滴对气溶胶的碰并，还与降雨期间其他清除因素有很重要的关系，其中最重要的是伴随气团运动产生的水平和垂直方向上的风对气溶胶的稀释和清除作用．所以只利用气溶胶数浓度在降水过程中的变化，难以直接判断降水湿清除的具体作用，也不能排除气团剧烈运动对气溶胶产生的影响，有时甚至会得到错误的结论．

此外，有学者对降水对气溶胶的清除机制进行系统分析和综合考虑，发现雨滴与气溶胶粒子的碰并清除过程与气溶胶的数浓度分布、雨滴谱、下落末端速度及是否有雷电过程等均有着密切的联系．Chate 等[10]对碰并机制和碰并系数公式进行了系统总结，雨滴下落过程中与气溶胶碰并的机制主要有布朗扩散、方向拦截、惯性碰撞、热泳、扩散电泳及静电作用机制．王瑛等[11]利用以上机制进行定量计算得到：当 $d_p < 0.2$ μm 时，碰并系数随着气溶胶直径的减小而增大；当 $d_p > 2$ μm 时，碰并系数随气溶胶直径增大迅速升高；而在 10 μm 后碰并系数几乎不随气溶胶直径变化，当 $d_p > 10$ μm 时，碰并系数接近 1，不随粒径增大而增大；在气溶胶粒径 0.2 ~2 μm 范围内，碰并系数较低，这也正与 Greenfield 在 1957 年定义的“Greenfield gap”[12]相对应．所以，明确降水对气溶胶碰并清除的具体机制，更有助于利用监测资料分析降雨对气溶胶的清除作用[13~18]．有部分学者利用不同碰并系数的经验公式，结合实测的雨滴谱、气溶胶粒子谱或气溶胶浓度以及气象要素资料，得到气溶胶清除系数与雨强的公式[19~24]．

综上，影响降水对气溶胶清除作用的因素很多，机制复杂，仅通过降水前后气溶胶监测资料的对比，无法准确反映降水本身的清除作用以及各种影响因素的综合作用，尤其无法排除气团对环境气溶胶清除作用的影响；将多种清除机制的理论公式相结合计算降水清除系数，考虑因素复杂，计算繁琐，亦不可能全面描述环境中的实际过程，且很难获取环境中的相关参数，计算结果与观测数据仍会有较大差距．所以，为了突出降水对气溶胶清除的最主要机制，便于相关计算，同时更易于明确对降水湿清除作用的认识，本研究不考虑静电、电泳、及雷暴等特殊条件和极端情况，利用描述粒子碰撞几率的斯托克斯数，分析降水对气溶胶的清除作用．此外，为了进一步说明降水对气溶胶的实际清除效果，利用实测的环境 $PM_{2.5}$ 浓度及对应气象要素资料，对降水过程中气溶胶浓度的变化情况进行了分析．

1　材料与方法

根据 Chate 等[25]的研究结果表明，在气团比较稳定，忽略强对流以及湍流等气团的垂直运动等特殊情况，在气溶胶与雨滴进行碰撞的一般过程中，起主要作用的是惯性碰撞(inertial impaction)，与气溶胶颗粒物的惯性碰撞紧密结合的一个物理量便是斯托克斯数 Stk．

斯托克斯数 Stk 是一个无量纲量，在空气动力学中，通常用斯托克斯数 Stk 来描述气流中的颗粒物与某物体障碍物碰撞的可能性．当斯托克斯数 Stk 为 1 时，碰撞几率约为 50%．斯托克斯数 Stk 越大，碰撞的几率就越大．对应的斯托克斯数 Stk 的计算公式为：

$$\mathrm{Stk} = \frac{\rho_p C_c d_p^2 U}{18\eta d_b} \tag{1}$$

式中，ρ_p 是指颗粒物的密度，C_c 是指滑移修正系数(slip correction factor)，d_p 是指颗粒物的直径，U 是指物体对空气的相对速度，d_b 是指物体的尺度．η 为空气的黏性系数，在 NTP(293.15 K 和 101.3 kPa)下为 18.203×10^{-6} Pa·s[26]．式中滑移修正系数 C_c 与空气的平均自由程 λ 和颗粒的直径 d_p 等有关[27]．

基于以上理论，对雨滴与气溶胶粒子的碰撞过程进行了分析．在本文中的碰撞具体是指，假定大气稳定，空气中的粒子静止不动的前提下，雨滴下落与气溶胶颗粒物碰撞的过程．其中，所用的斯托克斯公式中的气溶胶颗粒物的密度 ρ_p 约为 1.7×10^3 kg·m^{-3}，d_p 是指气溶胶颗粒物的直径，d_b 是指雨滴的直径，U 是指雨滴相对于空气的下降末速度．斯托克斯数 Stk 的计算公式中的 d_b 与 U 均取自于 Mason 所总结的数据结果[28]．

降水时湿度增加会致使气溶胶吸由于吸湿而尺度增大，结合一定的吸湿增长因子可以计算出增长后的粒子尺度和平均密度，进而代入式(1)而进行斯托克斯数的计算．但本研究主要是从机制角度讨论粒子与雨滴碰撞的具体几率，且气溶胶成分、混合状态等因素也会造成其吸湿增长能力有较大差异．此外，气溶胶吸湿后，如果将其整体作为气溶胶粒子，只是其平均密度会有所降低，所以本文在计算

时均假定气溶胶为干燥状态.

虽然只利用观测资料无法有效地对降水对气溶胶的影响效果进行评估,但从统计方面可以定性说明降水与 $PM_{2.5}$ 浓度的关系. 如果降水对气溶胶粒子有明显的清除作用,在绝大多数的降水过程中,$PM_{2.5}$ 的浓度都应该明显降低. 而在实际情况中,很多降水过程中 $PM_{2.5}$ 的浓度并没有明显降低,反而有所升高. 鉴于此,本研究收集了海淀宝联大气成分站及海淀自动观测站两年逐时的 $PM_{2.5}$ 浓度资料以及对应时刻的气象要素数据,系统汇总整理了该期间所有的降水过程,对 $PM_{2.5}$ 浓度在整个降水过程中的具体变化情况进行分析统计. 此外,还从中选取了典型个例,对降水过程中气溶胶精细化粒径分布特征的变化特点进行分析.

2 结果与分析

2.1 雨滴下落与气溶胶碰并的斯托克斯数

利用式(1)对不同粒径雨滴与不同大小的 $PM_{2.5}$ 粒子的碰撞几率进行计算,结果见表 1.

从表 1 中可以看出,在颗粒物粒径不变的情况下,随着雨滴粒径的增大,斯托克斯数 Stk 先增大后减小. 大雨的雨滴直径一般有 3 ~4 mm,最大时可达 7 mm,而毛毛雨的雨滴直径则在 0.5 mm 以下. 当雨滴粒径为 0.5 ~1 mm 时,所对应的斯托克斯数 Stk 是最大的,即表明在该区间的雨滴对颗粒物的冲刷作用最强. 当颗粒物粒径较小的时候,斯托克斯数 Stk 均为 0,表明雨滴对于粒径较小的粒子,惯性碰撞清除的作用很小. 当雨滴粒径逐渐增大时,式(1)中的雨滴相对于空气的下降末速度 U 也在增加,但其增加幅度越来越小,导致 U/d_b 的值在不断减小,从而使其计算得到的斯托克斯数 Stk 也不断降低,即表明较大的雨滴对气溶胶的清除作用有所降低.

在雨滴粒径不变的情况下,斯托克斯数 Stk 会随着颗粒物粒径的增大而增大,即雨滴对较大颗粒物粒子的冲刷作用强,对较小的颗粒物冲刷作用弱. 同时,本研究计算了不同粒径雨滴所对应的斯托克斯数 Stk 为 1 时颗粒物粒径的大小. 结果发现,即使清除作用最强的 0.5 ~1 mm 的雨滴,对应的斯托克斯数 Stk 为 1 时颗粒物粒径也是 6.80 μm 左右. 对于粒径为 2 μm 以下的颗粒物,其斯托克斯数 Stk 均远小于 1. 因此,降水对环境中的 $PM_{2.5}$ 碰撞清除作用很小,对于粒径大于 2 μm 的粗颗粒物,碰撞清除作用相对较大.

此外,当 Stk =1 时对各不同粒径雨滴所对应的颗粒物粒径计算发现,雨滴无论大小,其对应有明显清除作用的粒子都是粗颗粒物.

表 1 斯托克斯数计算结果列表

Table 1 Summary of calculation results for Stokes number

颗粒物粒径 d_p/μm	雨滴粒径 d_b/mm						
	0.01	0.1	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0
0.01	0	0	0	0	0	0	0
0.1	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0
1.0	0	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01
1.5	0	0.03	0.05	0.05	0.04	0.03	0.02
2.0	0.01	0.06	0.09	0.09	0.07	0.06	0.04
5.0	0.04	0.34	0.55	0.54	0.43	0.36	0.24
8.0	0.10	0.87	1.38	1.36	1.10	0.91	0.62
10.0	0.16	1.35	2.15	2.12	1.71	1.42	0.96
当 Stk =1 时所对应的颗粒物粒径 d_p/μm	25.27	8.60	6.80	6.84	7.63	8.39	10.22

2.2 降水过程中 $PM_{2.5}$ 浓度变化

利用海淀宝联大气成分站及海淀自动观测站实测的 2012 年 10 月 ~2014 年 10 月逐时的 $PM_{2.5}$ 浓度以及对应时刻的气象要素数据,定性分析了降水对气溶胶质量浓度的影响. 两年中共有 151 次降水过程,对应 637 个时次有降水记录. 其中,降水结束后 $PM_{2.5}$ 浓度下降的有 96 次,而降水后 $PM_{2.5}$ 浓度上升的降水过程则达到 55 次. 各季节降水过程次数见表 2. 为了评估降水对气溶胶影响的整体作用,且由于总次数很少,所以在统计过程中没有剔除降雪过程.

表 2 各季节降水过程次数

Table 2 Number of precipitation processes in each season

季节	春季	夏季	秋季	冬季
降水过程/次	19	86	32	14

其中,在 $PM_{2.5}$ 浓度降低的 96 次降水过程中,只有 23 次降水过程 $PM_{2.5}$ 浓度降到降水前 80% 以下,

其余过程 $PM_{2.5}$浓度降低均在 20% 以内,23 次 $PM_{2.5}$浓度明显降低的过程中,其中有 20 次降水过程伴随有强北风(最大风速达 4 ~5 $m\cdot s^{-1}$),即 $PM_{2.5}$浓度的明显降低与风的作用密切相关[29]. 此外,在 55 次 $PM_{2.5}$浓度升高的降水过程中,甚至有 24 次降水后 $PM_{2.5}$的浓度上升为降水前的 1.2 倍以上,说明降水对 $PM_{2.5}$浓度没有必然的降低作用.

本研究对 637 个降水时次进行了系统的统计,分析每个时次对应的 $PM_{2.5}$浓度变化. 如果降水对 $PM_{2.5}$有明显的碰撞清除作用,那么绝大多数的降水时次对应的 $PM_{2.5}$浓度均应有所下降,且其中雨强较大的时次,对应的 $PM_{2.5}$浓度降低幅度应更显著. 但分析结果表明,对应 $PM_{2.5}$浓度下降的降水时次仅有 334 个,占到总时次的 52.4%,而 $PM_{2.5}$浓度上升的时次达到了 275 个,占到总时次的 43.2%,$PM_{2.5}$浓度没有变化的时次有 28 个,占到总时次的 4.4%;同时,笔者定义 $PM_{2.5}$浓度降到前一个时次的 80% 以下为明显降低,对不同雨强下的 $PM_{2.5}$浓度的变化情况进行了统计,得到表 3. 从中可以得到,导致 $PM_{2.5}$浓度明显降低的降水时次很少,即使是在雨强为小时降水量达到 8.1 mm 及以上的大雨及暴雨时,仍然有 6 个时次 $PM_{2.5}$浓度是上升的,浓度明显下降的只有 1 个时次,且在强降雨过程中经常伴随气团的剧烈运动,即强降雨过程中 $PM_{2.5}$的清除往往是由雨滴直接碰撞之外许多其他机制共同作用的结果. 总之,在降水过程中,绝大多数时次 $PM_{2.5}$并没有明显降低,即雨滴对 $PM_{2.5}$的碰撞清除作用是很有限的.

表 3　各雨强下 $PM_{2.5}$浓度变化次数统计

Table 3　Statistics on number of variations of $PM_{2.5}$ concentrations under various rainfall intensity

小时雨强	$PM_{2.5}$浓度变化		
	上升	下降	降到 80% 以下
小雨(≤2.5 mm)	251	269	5
中雨(2.6 ~8.0 mm)	18	45	5
大雨及暴雨(≥8.1 mm)	6	20	1

2.3　降水过程中气溶胶粒径分布变化

2012 ~2014 年,苏捷等[30]在北京城区利用宽范围粒径谱仪(WPS-1000XP)对气溶胶数粒径分布特征进行观测,进而分析了不同季节与不同天气条件下气溶胶粒径分布的变化特征,图 1 描述的是观测期间的一次降雨过程中气溶胶粒径分布变化情况,图 1(a)是该降水过程中气溶胶的数浓度的粒径分布,图 1(b)描述的是气溶胶的体积浓度的粒径分布(可反映质量浓度的分布状况),图 1(c)描述的是风向风速、$PM_{2.5}$浓度以及降水量的分布状况,从中可知,$PM_{2.5}$质量浓度主要分布在积聚模态(0.1 ~1.0 μm).

该次降雨发生在 2013 年 9 月 23 日,开始于 9 月 23 日 02:00,整个过程持续 11h,降水量小时均值为 1.3 mm,按雨量来说是中雨. 整个降水过程中,在 02:00 ~04:00 降水初期,降水量较大,其中03:00 ~04:00 的降水量达到 10.9 mm,在此过程中,降水对爱根核模态(<0.1 μm)和粗模态气溶胶(>1.0 μm)有明显的清除作用,但 $PM_{2.5}$质量浓度集中的积聚模态下体积浓度变化不明显,$PM_{2.5}$小时浓度有小幅度增长,从 03:00 的 81 $\mu g\cdot m^{-3}$增长至 04:00 的 89 $\mu g\cdot m^{-3}$,降雨过程对 $PM_{2.5}$浓度并没有明显降低作用. 05:00 开始,随着东北风的持续作用,$PM_{2.5}$浓度也随之迅速降低,在 07:00 降低至 8 $\mu g\cdot m^{-3}$. 随着风速的逐渐减小,扩散条件较差,$PM_{2.5}$浓度均值在 22:00 增加到 28 $\mu g\cdot m^{-3}$. 在上述典型的降雨过程中,降水对粗模态和爱根核模态粒子的清除效果较为明显;北风对积聚模态气溶胶浓度有十分显著的稀释和去除作用;而小风和静风状态下,降水对积聚模态气溶胶没有明显的清除作用,反而促使 $PM_{2.5}$浓度有所升高,这可能与降水环境下湿度增加,气溶胶通过吸湿增长进一步导致二次反应加剧有一定关系. 总体上,降雨过程中气溶胶粒径分布观测结果与王瑛等[11]利用清除机制计算得到的降水对 0.2 ~2 μm 范围内气溶胶的碰并系数较低的结果一致.

需要说明的是,2.1 节中计算得到的雨滴与 0.1 μm 以下粒子的斯托克斯数均为 0,而实际观测以及多种机制综合计算结果中,降雨对该区间粒子有明显清除,主要是由于笔者在计算中,假定所有气溶胶粒子均为静止状态,且斯托克斯数 Stk 主要考虑的是雨滴与粒子的惯性碰撞作用,而实际过程中,雨滴对于 0.1 μm 以下超细粒子主要是通过布朗扩散和方向拦截等机制进行清除.

3　讨论

在本研究中,首先利用无量纲量斯托克斯数 Stk 计算分析雨滴对气溶胶粒子的主要清除方式——惯性碰撞的作用. 在雨滴粒径一定时,颗粒物越大越容易被清除;在颗粒物粒径一定时,其被清除的几率会随着雨滴的增大,先增大后减小. 对于粒径为 2 μm 以下的细颗粒物,其斯托克斯数 Stk 均远小于

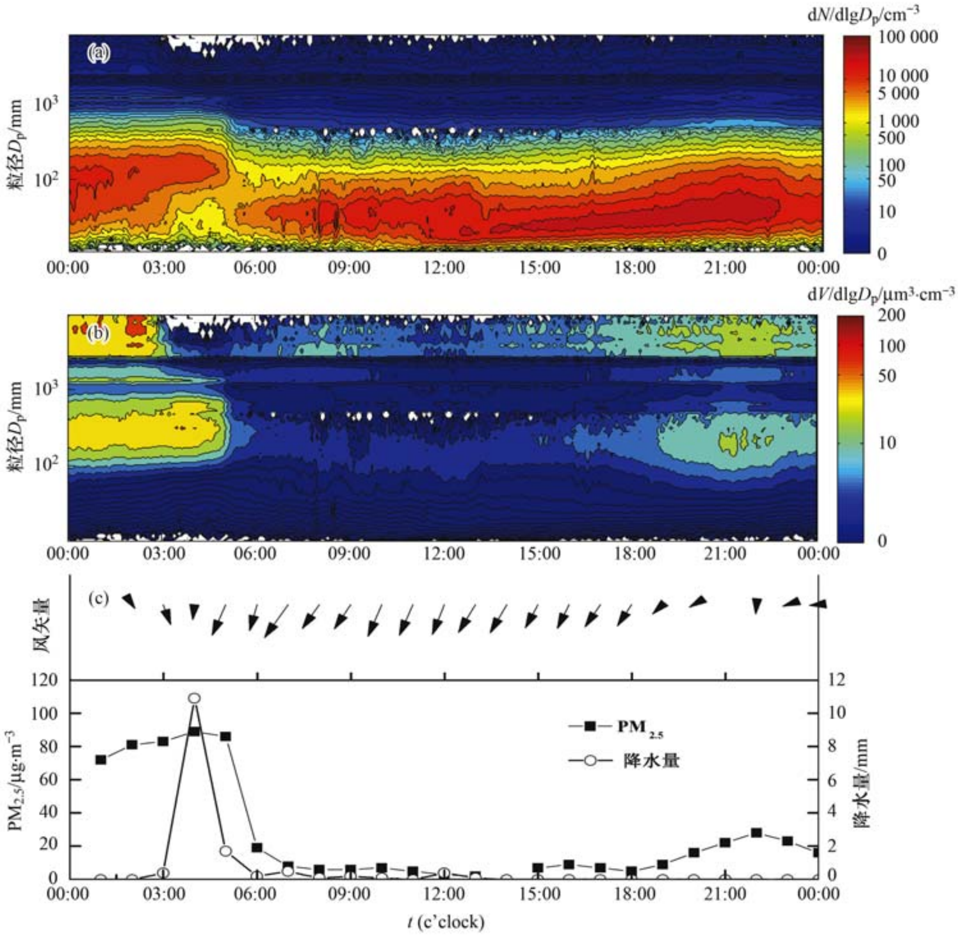

图 1　降雨过程中大气气溶胶粒径分布及相关要素的日变化特征

Fig. 1　Diurnal variation characteristics of the aerosol number size distributions and some related factors during the period of rainfall process

1,碰撞清除作用很小;对于粒径大于 2 μm 的粗颗粒物,碰撞清除作用相对较大.

通过对 2012～2014 年两年的降水过程的数据统计分析发现,在 151 个降水过程中,降水前后 $PM_{2.5}$浓度有明显降低的过程只占到总降水过程次数的 15.2%. 而且,在这些过程中,87.0% 的过程均伴随有大北风,这也充分说明了风在该清除过程中起了至关重要的作用. $PM_{2.5}$浓度上升的降水过程占到总降水过程 36.4%,浓度上升为降水前的 1.2 倍的降水过程占到了总上升次数的 43.6%. 此外,在 637 个降水时次中,$PM_{2.5}$浓度上升的时次占到总时次的 43.2%,下降的时次占到总次数的 52.4%. 而且,在所有的降水时次中,$PM_{2.5}$浓度明显降低的时次只占到 1.7%. 表明降水对 $PM_{2.5}$的清除作用很弱. 同时,通过对典型个例进行分析发现,降水对粗模态和爱根核模态粒子的清除效果较为明显;北风对 $PM_{2.5}$质量浓度集中的积聚模态气溶胶浓度有十分显著的稀释和去除作用;而小风和静风状态下,降水对积聚模态气溶胶没有明显的清除作用,反而促使 $PM_{2.5}$浓度有所升高.

需要说明的是,为了突出降水对气溶胶清除的最主要机制,便于相关计算和加强对降水湿清除作用的认识,在本研究中没有考虑静电、电泳及雷暴等特殊条件和极端情况,并且忽略了吸湿增长等较复杂的因素. 同时,本文研究的气团比较稳定,忽略强对流以及湍流等气团的垂直运动等特殊情况的一般过程. 而在实际情况中,以上未考虑因素都有可能发生,并对降水对气溶胶的清除产生影响. 所以,在具体降水过程中如果想得到实际的清除效率,需要针对以上因素进行综合考虑,全面细致地研究降水的湿清除作用.

4　结论

(1)在气团比较稳定,空气中的粒子静止不动的前提下,通过计算雨滴与气溶胶粒子碰撞的斯托克斯数 Stk 发现,对于粒径为 2 μm 以下的颗粒物,其斯托克斯数 Stk 均远小于 1,即雨滴对细颗粒物的碰撞清除作用较小. 对于粒径大于 2 μm 的粗颗粒

物,碰撞清除作用相对较大.

(2)通过对降雨过程中气溶胶粒径分布变化情况进行分析发现,降水对爱根核模态(<0.1 μm)和粗模态气溶胶(>1.0 μm)有明显的清除作用,但对积聚模态的清除作用不明显. 由于 $PM_{2.5}$的质量浓度主要分布在积聚模态,因此,降水对环境中的 $PM_{2.5}$直接碰撞清除作用很弱.

(3)通过对 $PM_{2.5}$浓度和对应时刻的气象要素长期的观测数据进行统计分析发现,绝大多数降水过程以及降水时次中 $PM_{2.5}$的浓度并没有明显降低,且有较多过程及时次中 $PM_{2.5}$的浓度是有所上升的,这也间接表明雨滴对 $PM_{2.5}$的碰撞清除作用很有限.

参考文献:

[1] Zhao P S, Dong F, He D, *et al*. Characteristics of concentrations and chemical compositions for $PM_{2.5}$ in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(9): 4631-4644.

[2] 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.

[3] Zhao P S, Zhang X L, Xu X F, *et al*. Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China[J]. Atmospheric Research, 2011, **101**(3): 711-718.

[4] 赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 等. 北京地区秋季雾霾天 $PM_{2.5}$污染与气溶胶光学特征分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 416-423.
Zhao X J, Pu W W, Meng W, *et al*. $PM_{2.5}$ pollution and aerosol optical properties in fog and haze days during autumn and winter in Beijing area. [J]. Environmental Science, 2013, **34**(2): 416-423.

[5] 薛亦峰, 周震, 聂滕, 等. 2015 年12 月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1593-1601.
Xue Y F, Zhou Z, Nie T, *et al*. Exploring the severe haze in Beijing during December, 2015: pollution process and emissions variation[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1593-1601.

[6] 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.
Hu M, Liu S, Wu Z J, *et al*. Effects of high temperature, high relative humidity and rain process on particle size distributions in the summer of Beijing[J]. Environmental Science, 2006, **27**(11): 2293-2298.

[7] 姚青, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 天津春季典型天气条件下气溶胶浓度谱分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2014, **28**(12): 64-70.
Yao Q, Cai Z Y, Han S Q, *et al*. Variety characteristics of aerosol mass concentration and number concentration in typical weather conditions during spring in Tianjin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, **28**(12): 64-70.

[8] 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.
Kang H Q, Zhu B, Fan S X. Size distributions and wet scavening properties of winter aerosol particles in north suburb of Nanjing[J]. Climatic and Environmental Research, 2009, **14**(5): 523-530.

[9] 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.
Wu Y X, Shen Z L, Huang M Y. Effect of precipitation on the concentrations of both the aerosol and the ion of rainwater in Chongqing area [J]. Plateau Meteorology, 1991, **10**(1): 52-60.

[10] Chate D M, Devara P C S. Parametric study of scavenging of atmospheric aerosols of various chemical species during thunderstorm and non-thunderstorm rain events [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, **110**(23): D23208.

[11] 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.
Wang Y, Zhu B, Kang H Q, *et al*. Theoretical and observational study on below-cloud rain scavenging of aerosol particles[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2014, **31**(3): 306-313, 321.

[12] Greenfield S M. Rain scavenging of radioactive particulate matter from the atmosphere[J]. Journal of Meteorology, 1957, **14**(2): 115-125.

[13] 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.
Peng H, Qin Y. The parameterization of the influence of precipitation on the washout of aerosol particles [J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1992, **16**(5): 622-630.

[14] 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.
Zhao H B, Zheng C G. Numerical simulation of wet removal of aerosols when raindrop falling [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, **25**(12): 1590-1596.

[15] 赵海波, 郑楚光. 水滴清除气溶胶过程的随机算法和数值模拟[J]. 应用数学和力学, 2006, **27**(10): 1159-1168.
Zhao H B, Zheng C G. Stochastic algorithm and numerical simulation for drop scavenging of aerosols [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, **27**(10): 1159-1168.

[16] 孙根厚. 上甸子站夏季降水期间气溶胶湿清除影响的观测研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2012. 14-17.
Sun G H. Observational study on the influence of wet deposition of aerosols during summer precipitation at Shangdianzi station [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2012. 14-17.

[17] Chate D M, Pranesha T S. Field studies of scavenging of aerosols by rain events[J]. Aerosol Science, 2004, **35**(6): 695-706.

[18] Chate D M, Murugavel P, Ali K, *et al*. Below-cloud rain scavenging of atmospheric aerosols for aerosol deposition models [J]. Atmospheric Research, 2011, **99**(3-4): 528-536.

[19] Jaenicke R. Tropospheric aerosols[A]. In: Hobbs P V (Ed.). Aerosol-Cloud-Climate Interactions[M]. San Diego: Academic Press, 1993. 1-31.

[20] 郭俊. 空气污染物降雨清除的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2000. 16-21.

[21] Andronache C. Estimated variability of below-cloud aerosol

removal by rainfall for observed aerosol size distributions[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2003, **3**(1): 131-143.

[22] Loosmore G A, Cederwall R T. Precipitation scavenging of atmospheric aerosols for emergency response applications: testing an updated model with new real-time data[J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(7): 993-1003.

[23] 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.

[24] Mircea M, Stefan S, Fuzzi S. Precipitation scavenging coefficient: influence of measured aerosol and raindrop size distributions[J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(29-30): 5169-5174.

[25] Chate D M. Study of scavenging of submicron-sized aerosol particles by thunderstorm rain events[J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(35): 6608-6619.

[26] Rader D J. Momentum slip correction factor for small particles in nine common gases[J]. Journal of Aerosol Science, 1990, **21**(2): 161-168.

[27] Kulkarni P, Baron P A, Willeke K. Aerosol measurement: principles, techniques, and applications (3rd ed.)[M]. New York: John Wiley and Sons, 2011. 18-20.

[28] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003. 332-333.

[29] 赵辉, 郑有飞, 吴晓云, 等. 青年奥林匹克运动会期间南京市主要大气污染物浓度变化与分析[J]. 环境化学, 2015, **34**(5): 824-831.

Zhao H, Zheng Y F, Wu X Y, *et al*. Variation and analysis of air pollutants concentration in Nanjing during the Youth Olympic Games[J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(5): 824-831.

[30] 苏捷, 赵普生, 陈一娜. 北京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.

Su J, Zhao P S, Chen Y N. Characteristics of number concentration size distributions of aerosols under different weather processes in Beijing[J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1208-1218.

HUANJING KEXUE Vol. 37 No. 10
Environmental Science (monthly) Oct. 15, 2016

CONTENTS

环境科学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2016 年 10 月 15 日　第 37 卷　第 10 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 37　No. 10　Oct. 15, 2016

主　管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主　办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　版	科学出版社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发　行	科学出版社 电话：010-64017032 E-mail：journal@mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com
订购处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 （北京 399 信箱）	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN　0250-3301 / CN　11-1895/X　　国内邮发代号：2-821

国内定价：120.00 元　　国外发行代号：M 205

国内外公开发行