张泽宇,银 燕,王红磊,等.华东背景地区降水对亚微米级气溶胶的湿清除效率及其影响因素研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(11):5969-5979.
Zhang Z Y, Yin Y, Wang H L, et al. The wet scavenging efficiency of precipitation on submicron aerosols and its influencing factors in the background region of East China [J]. China Environmental Science, 2025,45(11):5969-5979.

华东背景地区降水对亚微米级气溶胶的湿清除效率及其影响因素研究

张泽宇[1],银 燕[1*],王红磊[1],陈 魁[2],朱士超[3],纪 雷[3] (1.南京信息工程大学大气物理学院,中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室,江苏 南京 210044；2.南京信息工程大学应急管理学院,江苏 南京 210044；3.安徽省人工影响天气办公室,安徽 合肥 210031)

摘要:基于 2023 年 4~6 月黄山汤口站点的高分辨率气溶胶数浓度与气象观测数据,分析了不同降水过程对亚微米级气溶胶(粒径 0.01~1μm)4 个模态(成核模态、爱根核模态、凝结模态、液滴模态)的湿清除效率及其影响因素.研究结果表明:降水日亚微米级气溶胶数浓度较非降水日平均降低 27.8%,其中粒径范围 0.1~1μm 的气溶胶数浓度降幅达 36.32%,且清除效率随粒径增大而提升.小雨事件中降水强度差异对粒径 0.1~1μm 粒子清除率的影响随粒径增大而减小,大雨相比中雨整体清除率更高.不同初始浓度与降水持续时间下的清除效果存在差异,较高初始浓度环境下 0.03μm 以上粒子的清除率显著提升,而长历时降水(39h)对 4 个模态的清除效果均产生更明显的清除效果.降水过程的不同阶段,小粒径气溶胶(粒径<0.1μm)的清除在降水的前期与末期与再悬浮、温度和局地风速具有一定的相关性,而积聚模态(0.1~1μm)在降水中期雨强较大时清除更显著,其中粒径>0.6μm 的粒子在雨后无显著浓度反弹.本研究揭示了降水对亚微米气溶胶的清除效率及其环境依赖性,为理解降水对大气气溶胶的湿清除机制提供理论支撑.

关键词：气溶胶；降水特征；湿清除效率；粒径
中图分类号：X513 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)11-5969-11

The wet scavenging efficiency of precipitation on submicron aerosols and its influencing factors in the background region of East China. ZHANG Ze-yu[1], YIN Yan[1*], WANG Hong-lei[1], CHEN Kui[2], ZHU Shi-chao[3], JI Lei[3] (1.Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China；2.School of Emergency Management, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China；3.Anhui Weather Modification Office, Hefei 210031, China). *China Environmental Science*, 2025,45(11)：5969~5979

Abstract：Based on high-resolution measurements of aerosol number concentration and meteorological data that had been obtained at Tangkou Meteorological Station on Mts. Huangshan from April to June 2023, the wet scavenging efficiency of submicron aerosol particles (with a particle diameter range of 0.01~1μm) across the four modes (nucleation mode, Aitken mode, condensation mode, and droplet mode) and its influencing factors were analyzed in this study. The results showed that the number concentration of submicron aerosol particles on precipitation days was averagely 27.8% lower as compared to non-precipitation days (the difference even reached 36.32% for particles in the diameter range of 0.1~1μm), and the scavenging efficiency was found to increase with aerosol particle size. It was also shown that the differences in precipitation intensity influenced the scavenging efficiency of different size particles differently. During light rainfall events, the impact of precipitation intensity on the removal rate of particles larger than 0.1μm was observed to weaken as particle size increased, whereas heavy rain was found to exhibit a higher overall removal efficiency as compared to moderate rain. The scavenging effect was found to vary with initial particle concentration and precipitation duration: Under high initial concentrations, the removal efficiency of particles larger than 0.03μm was shown to increase significantly, while prolonged precipitation (39h) was found to enhance the scavenging effect across all four modes. At different stages of the precipitation process, the removal and resuspension of smaller particles (with a particle size<0.1μm) were determined to be correlated with temperature and local wind speed at the beginning and end of precipitation events. Accumulation-mode particles (0.1~1μm) were more effectively removed during the periods of high rainfall intensity, with particles larger than 0.6μm being observed to show no significant concentration rebound after precipitation. This study revealed the efficiency of precipitation in removing submicron aerosols and its environmental dependence, and provided theoretical support for understanding the wet removal mechanism of atmospheric aerosols.

Key words：aerosol；precipitation characteristics；wet scavenging efficiency；particle size

收稿日期：2025-04-01
基金项目：中部人工影响天气能力建设项目(ZQC-T22253)

* 责任作者，教授, yinyan@nuist.edu.cn

气溶胶指悬浮在大气中的固态或液态颗粒物,既可通过影响辐射[1]及云降水发展过程[2-5],直接或间接地对气候产生影响,也可作为病毒传播载体[6]或经呼吸道系统直接对人体产生健康危害[7].

影响大气中气溶胶浓度增减的因素主要包括工业发展、人为活动排放等人为因素以及如降雨、温度、湿度、风力、风向等自然因素[8].自然界对气溶胶的沉降作用主要通过干、湿沉降机制[9].在湿沉降过程中,气溶胶可通过云内和云下清除被移除.其中云下清除主要是通过雨滴在沉降过程中捕获气溶胶颗粒完成的,包括碰撞与合并、布朗扩散、惯性沉降及吸湿增长等物理过程[10].因此降雨是云下清除的主要过程,也是大气污染物去除的重要途径之一[11].

降雨过程的湿清除效率因受降水强度、降水时长及气溶胶粒径和物理性质[12-13]等影响而存在差异.近年来国内外学者对气溶胶质粒清除粒径依赖性开展的相关研究发现,不同强度的降雨对不同粒径气溶胶的清除效率不同,且与雨滴大小有关,且关系通常较为复杂,受多种因素影响[14].通常随降雨强度增大,最小收集效率粒径和收集效率均提高,且最小收集效率粒径通常在微米级范围内[15].降雨日的$PM_1/PM_{2.5}$有所下降,而$PM_{2.5}/PM_{10}$则有所上升,表明降雨主要清除粒径小于 1μm 和 2.5~10μm 的大气气溶胶粒子[16].PM_1、$PM_{2.5}$以及PM_{10}的下降时次比例与浓度下降比例均随降水雨强的增大而有所增大,其中PM_{10}的下降幅度大于PM_1、$PM_{2.5}$[17],且在降雨量比较大时,下降趋势更加明显[18].但降雨强度与清除率并不一定始终呈正比,一次基于西班牙城市站点的研究发现降水在 1~3mm/h 的事件清除率低于 1mm/h 的事件[19].

国内目前较多关于降水对大气颗粒物湿清除率的研究主要集中在城市站点空气质量数据的统计性描述[20-21].此类研究可较好反映城市 $PM_{2.5}$、PM_{10} 和水溶性气体等在不同降水过程中的清除率差异,不仅对城市环境空气质量的变化以及预判有较好的促进,对城市洒水降尘及人工影响天气工作也具有较好的实际意义[22],同时对于预报模式的改进也有一定的作用[23-24].其不足之处在于难以体现降雨对不同粒径范围内特别是亚微米级气溶胶颗粒物的湿清除差异及其物理机制.

相较城市站点,黄山属于华东平原的高海拔区域,远离城市工业污染源,局地污染影响较小[25],空气较为清洁,且黄山地区丰富的植被与水汽结合特殊的地形结构使得该地区云雾和降水过程频繁,年平均降雨日占全年约 50%,且多集中于 4~6 月,可在有限的观测周期内提供较充足的自然降水观测条件.此外该地区已有多年气溶胶观测实践,可为深入研究提供经验支持.因此,云下降水对大气颗粒物的湿清除作为影响气溶胶颗粒物浓度的重要过程之一,研究黄山地区降水对不同粒径范围内亚微米级气溶胶数浓度的湿清除效率不仅能够丰富国内对不同地区湿清除作用的研究,也可以进一步探究降雨前后气溶胶颗粒物不同粒径范围的数浓度变化,为研究清除机制的粒径依赖性以及优化数值模式提供一定的基础观测依据,具有重要的理论意义和实际参考价值.本研究利用黄山汤口站点 2023 年 4~6 月观测的气溶胶数浓度数据及同期逐小时气象数据,对观测期内降雨过程前后不同粒径亚微米级气溶胶的数浓度差异进行分析,探讨降水对气溶胶湿清除效率的粒径依赖性及其影响因素, 以期为理解降水对大气气溶胶的湿清除机制提供理论支撑.

1 数据来源与研究方法

1.1 气象数据

气象数据由黄山站点提供,时间分辨率为小时,气象数据包含温度(℃)、湿度(%)、气压(hPa)、风速(m/s)以及降水量(mm),其中降水量数据来源为气溶胶同步观测的雨量计,精度为 0.2mm.

1.2 气溶胶数据

本研究使用 2023 年 4~6 月黄山汤口站点(30°5'N,118°9'E)观测的气溶胶数浓度数据.观测设备(BMI SEMS2100,美国 Brechtel 公司制造)由系统控制器、差分迁移率分析仪(DMA)、混合冷凝粒子计数器(MCPC)及运行控制软件的 Windows 计算机组成.为避免水分对气溶胶粒子电迁移率的影响,系统还配备了 Nafion 干燥器以减少样品气体中的水分含量.该观测设备的工作原理是基于气溶胶粒子在电场中的迁移率差异,通过精确控制鞘流和样本流速率,在 DMA 中实现不同尺寸粒子的有效分离.经干燥处理后的样品气进入 DMA 进行筛选,随后被筛选出的不同尺寸粒子进入 MCPC 进行放大与计

数.系统利用反演算法处理原始数据,从而准确计算出粒径分布,同时校正扩散损失和管道延迟时间以提高测量精度.本研究利用该设备分别对 0.01~0.5μm 以及 233~38162nm 范围内共 91 档粒径气溶胶数浓度进行测量.

1.3　数据处理与分析方法

本研究考虑亚微米级气溶胶数浓度,分为 4 个模态:成核模态(0.01~0.03μm),爱根核模态(0.03~0.1μm),凝结模态(0.1~0.3μm)以及液滴模态(0.3~1μm)[26].气溶胶数浓度原始观测数据为各档下 $n = \mathrm{d}N/\mathrm{dlog}D_\mathrm{p}$,为对数谱分布,单位为 cm^{-3}.气溶胶总数浓度 N 计算公式为:

$$N = \int_{-\infty}^{\infty} n \mathrm{d}\log D_\mathrm{p} \tag{1}$$

为匹配气象数据的时间分辨率,对处理后的数浓度数据进行小时平均.

本研究定义第一次出现 0.2mm/h 及以上强度的时刻为降水开始时间 t_0,以间隔前最后一次 0.2mm/h 及以上强度的降水时刻作为降水结束时间 t_1,将开始时间前 3h 气溶胶数浓度平均值记为 C_1,以结束时间后 3h 气溶胶数浓度平均值记为 C_2,将间隔在 3h 及 3h 以上小时降水强度持续为 0mm/h 为两次降水事件,并将每一次降水事件对气溶胶数浓度的清除率定义为 R,计算式为:

$$R=(C_1-C_2)/C_1\times 100\% \tag{2}$$

清除系数 BWSC(Below-cloud Wet Scavenging Coefficient)记为 λ,由式(3)得到[27].

$$\lambda = -\frac{1}{t_1 - t_0} \cdot \ln\left(\frac{C_2(D_P)}{C_1(D_P)}\right) \tag{3}$$

为进一步减少风速对湿清除效率的影响,本研究中针对降水清除效果的分析将排除降雨过程中平均风速高于 1m/s 的降水事件.

2　结果与分析

2.1　降水日与非降水日数浓度粒径分布差异

首先对降水日与非降水日内气溶胶粒径分布的整体差异进行分析.为避免气溶胶数浓度的日变化对分析带来的影响,通过排除方差较大、日最高浓度过高与平均浓度过低的非降水日,选取 2023 年 4~6 月山底站点观测到的 20d 未降水日以及 36d 降水日 24h 完整的气溶胶数浓度记录进行分析.

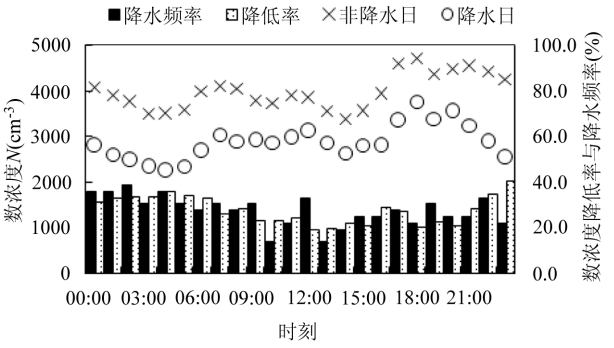


图 1　(非)降水日各时刻气溶胶数浓度平均值、降低率以及降水频率

Fig.1　Average aerosol number concentration, reduction rate, and precipitation frequency at different times on (non-)precipitation days

如图 1 所示,黄山非降水日内气溶胶数浓度呈现较为规律的日变化,24h 内气溶胶数浓度范围处于 3000~5000cm^{-3},分别于 07:00,11:00,18:00 对应一个数浓度峰值,整日平均数浓度约为 3987cm^{-3},与陈潇潇等[28]2011 年的观测结果具有一定相似性,进一步验证该观测站点环境较为稳定.降水日亚微米级气溶胶平均数浓度约为 2879cm^{-3},相比于非降水日降低约 27.8%.36 个降水日内 0:00~23:00 各时刻发生降水的频率整体呈现出先降低后升高的趋势,即夜雨的发生频率相对较多.以非降水日同时刻浓度进行对比,降水日各时刻亚微米级气溶胶数浓度下降率与该时刻降雨频率呈现较好的正相关性,约为 0.48.其中 0:00~06:00 以及 21:00~23:00 的数浓度下降率较高,该时段平均降雨频率为 31.7%,气溶胶数浓度平均下降率约为 34.0%,日出后至傍晚的降雨频率与浓度下降率均相对较低,分别为 24.8%与 23.4%.

除了夜雨的发生频率较高,使得降水日夜间平均浓度较低以外,另一方面由于夜间人为活动减少,新的颗粒物排放输入相较白天有所降低,且夜间大气边界层较为稳定,混合层高度较低,垂直扩散受到抑制,此时段山谷发生降水可能将更易清除颗粒物[29].

通过对比降水日与非降水日的粒径分布差异(图 2),发现降水日相比于非降水日,气溶胶峰值粒径向更小粒径偏移,从 81.4nm 减小到 76.4nm;降水日各粒径范围内数浓度整体均有所降低:粒径小于 0.1μm 的气溶胶数浓度整体降低约 19.95 %,其中粒径 0.01~0.03μm 的核模态降低约 13.34%,粒径

0.03~0.1μm 的爱根核模态则降低约 20.59%.粒径在 0.1~1μm 内数浓度显著降低,约为 36.32%,其中 0.1~0.3μm 的凝结模态降低约 31.1%,0.3~1μm 范围内数浓度降低约 51.05%.整体而言,降水日内气溶胶不同模态浓度的下降率随粒径增加而增加,降水日粒径小于 0.1μm 的气溶胶数浓度降低率相较积聚模态更低,随着气溶胶粒径增大,降低率也呈现逐渐增大的趋势.

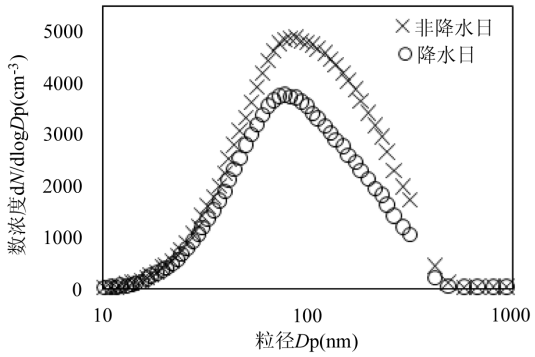


图 2 (非)降水日气溶胶数浓度粒径分布

Fig.2 Aerosol number concentration size distribution under (non−)precipitation days

由于本小节讨论的数浓度降低率是基于有降水事件发生的各粒径整日平均值进行对比,这并不完全等同于降雨带来的湿清除效率.本文将在 2.2 与 2.3 节中通过对比控制变量后的多个降水个例,对不同降水特征下各粒径范围内气溶胶数浓度的清除率差异进行分析.

2.2 不同降雨强度对各粒径清除率的影响

2.2.1 观测期内整体情况 美国气象学会对降水等级规定为每小时降水量≤2.5mm、2.5~7.6mm、>7.6mm 时的降雨(中国气象局划分为:12h 内降水量<5mm、5~15mm、15~30mm 或 24h 内降水量<10.0mm、10~24.9mm、25~49.9mm)分别为小雨、中雨、大雨.目前已有多项研究分析了不同降雨等级降水过程对大气颗粒物(尤其是 $PM_{2.5}$)清除率的影响.随着降水等级的提高,对雨后 $PM_{2.5}$ 质量浓度的清除率也在逐渐提高,而微量降水有概率促成雨后 $PM_{2.5}$ 质量浓度的反弹[30-32]

根据上述 1.3 节中对降水事件与清除率的定义,本研究观测周期内统计的降水事件清除效果如图 3 所示.随粒子粒径增大,清除率整体增高;成核模态清除效果较差,易出现负清除.粒径在 300~1000nm 范围内的气溶胶清除率高于 600~1000nm 的清除率,这表明降水过程显著降低了液滴模态中 300~600nm 粒径的气溶胶,而粒径超过 600nm 的清除率则相对较差,这可能是由于该粒径范围处于积聚模态的清除间隙导致.通过比较不同降水强度下的清除率,平均降水强度在 1~3mm/h 的降水过程对粒径超过 100nm 的粒子清除效率优于平均降水强度低于 1mm/h 的降水过程.与 Blanco 等[19]的研究中亚微米级气溶胶数浓度在同降水强度下的清除率特征具有一定相似性.

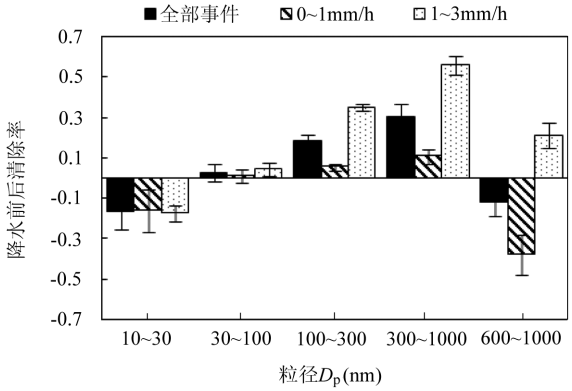


图 3 不同降水强度下各模态粒子平均清除效率

Fig.3 Average scavenging efficiency of particles in different modes under various precipitation intensities

2.2.2 个例对照 为进一步分析不同降水强度对各粒径清除率影响,进行 A、B 两组不同降水强度下的个例对照,其中每组各包含两个个例.在个例选择上遵循控制变量的原则,即每组个例除整场降水过程中平均雨强存在较大差异外,保证环境整体污染程度与降水时长均相近,以求减少环境初始浓度与降水时长的差异对分析结果的影响.

A 组为降雨时长在 3h 左右的两次不同降雨量的小雨,初始浓度均属于常规较清洁的状态.B 组的两个个例降雨等级分别为中雨与大雨,在日期上较为接近,降雨时长为 20h 左右,初始浓度均属于站点非降水日的平均范围内.为方便说明,后续分析中的成核模态、爱根核模态、凝结模态、液滴模态分别记为 M_1,M_2,M_3,M_4.表 1 给出 A、B 组降水事件的基础气象信息.

A 组两次降水过程均发生在 00:00~08:00.第一次降水过程发生在 4 月 14 日 03:00~05:00,共降水 4.2mm,降水过程中的平均雨强为 1.4mm/h,最大小

时降水量为 2.0mm,发生在 04:00;A 组第二次降水过程发生在 6 月 6 日 02:00~04:00,共降水 0.4mm.两次降水事件均属于小雨等级,且发生的时段类似.气溶胶初始总数浓度相对接近,分别为 3074.90cm^{-3} 与 2944.65cm^{-3},均属于较清洁的环境状态,平均风速低于 1m/s.过程中的平均雨强则相差较大.

表 1　A、B 组降水事件基本气象参数信息

Table 1　Basic meteorological parameters of rainfall events for groups A and B

组别	日期	降水量 (mm)	时长 (h)	平均雨强 (mm/h)	最大小时雨强 (mm/h)	平均风速 (m/s)	平均温度 (℃)
A	4.14	4.2	3	1.4	2.0	0.24	16.3
	6.6	0.4	3	0.1	0.2	0.30	18.2
B	5.16	41.6	18	2.3	5.2	0.29	19.6
	5.21	14.6	20	0.7	7.8	0.42	20.2

由于 A 组个例降水时长较短,降水后 3h 平均浓度受环境浓度影响较为显著.根据 3.1 节中站点气溶胶数浓度的日变化规律,非降水日 00:00~08:00 4 个模态的变化率为 8.44%、−9.76%、8.53%以及 14.43%.其中非降水日在 00:00~04:00 环境内气溶胶浓度整体持续下降,4h 内可下降约 14.63%,其中 M_1、M_2、M_3 以及 M_4 分别下降 53.54%、22.19%、3.56%以及 48.75%.而在 05:00 后随日出温度升高以及人为活动的增强,气溶胶数浓度逐渐升高,04:00~08:00 各模态分别回升约 133.42%、15.97%、12.54%以及 11.65%.

图 4 展示了 A 组两次降水前后 3h 各模态浓度与变化率.两次降水前 M_1 数浓度均较低,使得雨后浓度回升幅度较大,但浓度值低于非降水日平均值.4 月 14 日 M_2 初始浓度(1541.17cm^{-3})与非降水日均值(2006.08cm^{-3})较为接近,同时段清除率为 41.41%,高于非降水日同时段的自然下降率;6 月 M_2 初始浓度较低,雨强较弱,下降率也较低.4 月 14 日与 6 月 6 日 M_3 初始浓度均接近非降水日均值,对比非降水日同时段变化率,A 组两次降水过程均对 M_3 产生了正的清除作用,且雨强较大的第一场降水清除率较高.M_4 在两场降水后下降较多,约为 50%,说明对较大粒子的清除率较高.

整体而言,两次小雨事件后,同时段各模态气溶胶浓度下降率均高于非降水日,降水量较大的 4 月 14 日降水事件后气溶胶浓度下降程度整体高于 6 月 6 日,说明降水强度较大时,清除效果更明显.在 A 组的短时弱降水中,M_1 清除率差异受日变化影响明显,M_2 和 M_3 清除率受平均降水强度影响较明显,并且随着粒径逐渐增大,M_2、M_3 和 M_4 在两场降水中清除率的差异逐渐减小.即弱降水中降水强度差异对清除率的影响随粒径增大而减小.

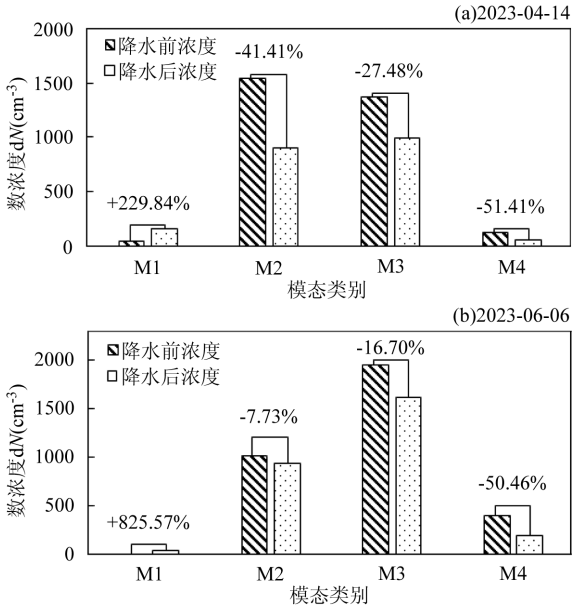


图 4　A 组两次降水事件前后气溶胶各模态浓度对比

Fig.4　Comparison of aerosol concentrations indifferent modesbefore and after rainfall events for Group A

图 5 展示了 B 组两次降水过程前后 3h 各模态浓度与变化率.B 组第一次过程降水发生在 5 月 16 日 16:00~5 月 17 日 16:00,24h 内降水量为 41.6mm,为 25.0~49.9mm,整个过程中平均雨强达 2.3mm/h,最大小时降水量为 5.2mm,属于大雨等级,平均风速 0.29m/s.B 组第二次降雨过程发生在 5 月 21 日 11:00~5 月 22 日 10:00,24h 降水量为 14.6mm,整个过程平均降雨强度为 0.7mm/h,最大小时降水量为 7.8mm,属于中雨等级,平均风速 0.42m/s.两场降水过程气溶胶初始总数浓度相对接近,分别为 4220.86cm^{-3} 与 4016.70cm^{-3},平均风速低于 1m/s.过程中的平均雨强相差较大.

B 组中两次降水过程中气溶胶 M_1 模态数浓度变化率较为接近,均上升约 40%.5 月 16~17 日的降水中,M_2 模态数浓度下降约 30.20%,5 月 21~22 日降水中 M_2 模态数浓度上升 20 %,第二次降水过程中最大小时降水量占该过程总降水量 50%以上,去除两场

降水中最大降水量时刻,平均雨强分别为 2.14 和 0.36mm/h.通过分析数据发现,5 月 16~17 日的最大降水量时刻对比前一时刻,M_3 模态数浓度大幅下降 82.45%.因此认为 M_3 模态气溶胶的清除效果受最大小时降水量影响较大,而 M_2 和 M_4 模态受过程平均降雨强度影响较大.

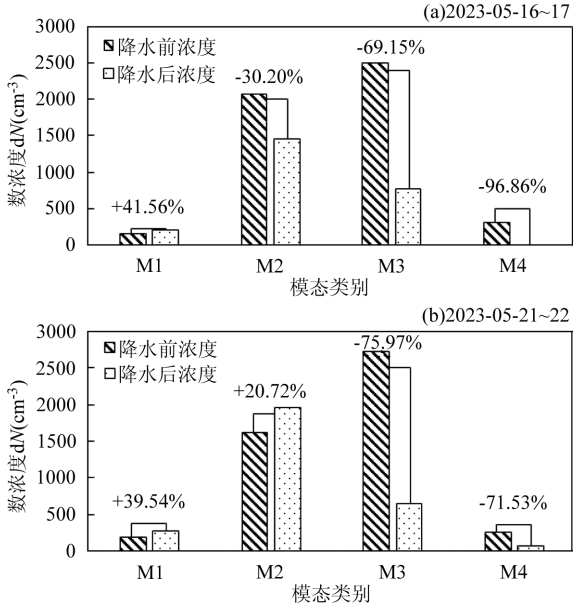


图 5 B 组两次降水事件前后气溶胶各模态浓度对比

Fig.5 Comparison of aerosol concentrations in different modesbefore and after rainfall events for Group B

综上所述,通过对比降水时长与环境污染程度一定但总降水量不同的两组降水过程发现,成核模态受降雨前后环境内浓度迅速变化的影响较大,易产生负清除,而 M_2、M_3、M_4 模态受降水强度影响较大,并随着粒径增大,清除率有所提升,雨强差异对清除率的影响逐渐减小.

2.3 气溶胶清除率与初始气溶胶浓度和降水时长的关系

不同降水过程前大气环境内的气溶胶初始浓度往往存在一定差异,但降水前后的气溶胶颗粒物浓度存在明显的正相关.清除率也受降水前的空气质量影响较大[33]:当初始浓度低于一定水平时,清除率往往较低,甚至出现负清除,而当初始浓度高于一定水平时,初始浓度与清除率呈现正相关[34-37].降水量对 $PM_{2.5}$ 主要表现为大时间尺度的负向作用[38],因此清除率通常也与降水时长呈现一定的正相关,并随着降水时长的增加,颗粒物清除率逐渐提高.部分短时降水可能造成浓度在降水后的反弹,在降水时长超过一定范围则会产生稳定的正向清除,而当降水时长进一步增加,环境浓度本身处于较清洁的状态时,清除率随时长的增加将变得有限[39-41].

表 2 给出 C、D 组降水事件的基础气象信息.其中 C 组选取了 2 次持续 5h 的降水事件(4 月 22 日 04:00~08:00 和 5 月 5 日 01:00~05:00),降水量分别为 11 和 9.2mm,平均雨强约为 2mm/h.两次降水事件前 3h 的平均初始浓度差异显著,分别为 5214.4cm^{-3}(环境浓度较高)和 2303.1cm^{-3}(环境浓度较清洁).降水前 3h 各模态初始数浓度占总数浓度比值相近,约为 2%、64%、30%和 4%.

表 2 C、D 组降水事件基本气象参数信息

Table 2 Basic meteorological parameters of rainfall events for groups C and D

组别	日期	降水量 (mm)	时长 (h)	平均雨强 (mm/h)	最大小时雨强 (mm/h)	平均风速 (m/s)	平均温度 (℃)
C	04-22	11	5	2.2	5.2	0.18	15.0
	05-05	9.2	5	1.8	2.4	0.33	19.6
D	04-22	41.2	39	1.1	6.2	0.17	13.5
	05-16	41.6	18	2.3	5.2	0.29	19.6

如图 6 所示,4 月 22 日降水 4 个模态清除率分别为−165.43%、37.51%、32.15%和 77.62%,而 5 月 5 日降水 4 个模态清除率分别为−113.22%、6.16%、28.44%和 37.14%.除 M_1 模态外,初始浓度较高的 4 月 22 日降水事件对 M_2、M_3 和 M_4 模态的清除效率更高.

D 组选取了两次总降水量相近的降水事件(4 月 22 日 12:00~24 日 02:00 与 5 月 16 日 19:00~17 日 12:00),总降水量约为 40mm,平均雨强约为 2mm/h.两次降水事件前 3h 的平均初始浓度分别为 3372.78cm^{-3} 和 4220.86cm^{-3}.两次降水事件持续时长差异显著,分别为 39 与 18h.

如图 7 所示,4 月 22~24 日降水后 4 个模态清除率分别为 84.18%、69.86%、82.95%、97.18%,5 月 16~17 日降水后 4 个模态清除率分别为−41.56%、30.20%、69.15%和 96.86%.D 组在总水量相近的情况下,初始浓度相对较低,但降水持续时间较长的个例对 4 个模态均产生了更好的清除效果.对 M_1 模态,4 月个例的降水结束时刻为 02:00,雨后 M_1 浓度未显著回升,5 月个例的降水结束时刻为 12:00,M_1 浓

度于雨后3h显著上升,进一步说明降水对M_1清除率受降水发生的时段影响较大,雨后风场等气象因素的改变使其浓度上升.对于 M_2、M_3、M_4 模态,随着模态粒径增大,降水持续时间的差异对清除率的影响逐渐减小.

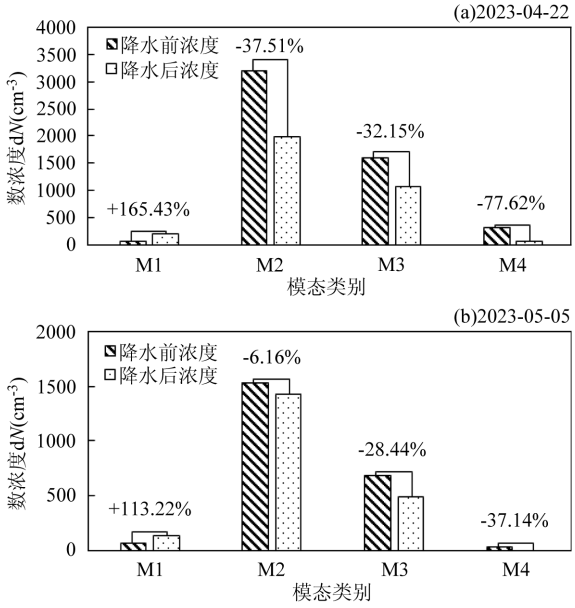


图 6　C 组两次降水事件前后气溶胶各模态浓度对比

Fig.6　Comparison of aerosol concentrations in different modes before and after rainfall events for Group C

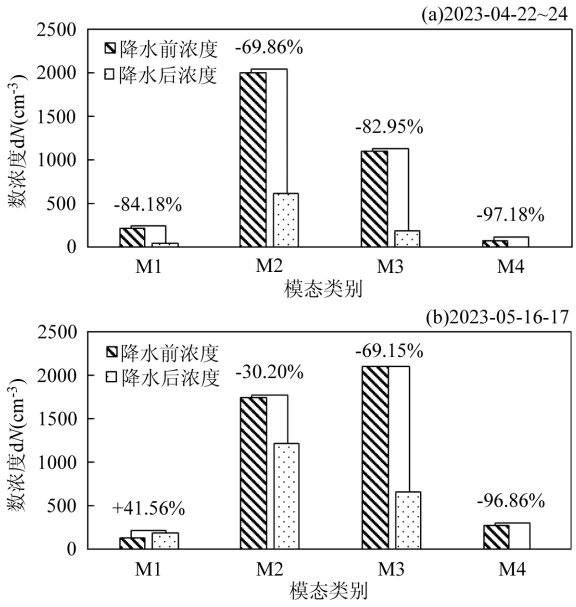


图 7　D 组两次降水事件前后气溶胶各模态浓度对比

Fig.7　Comparison of aerosol concentrations in different modes before and after rainfall events for Group D

整体而言,在降水特征相近的情况下,初始浓度较高的降水个例对粒径 0.03μm 以上的亚微米级气溶胶粒子产生了相对较高的清除效果.在初始浓度与降水总量相近的情况下,降水持续时间较长的个例中 4 个模态在雨后的清除率较高,并且通过对比发现,随着粒径尺度的增加,不同降水时长的两次事件 4 个模态清除率的差异在逐渐减小,这在一定程度上说明降水时长的差异对粒径0.1μm 以下模态数浓度影响相较积聚模态更大.

2.4　降水过程不同阶段的清除效率对比

根据上述分析可见,通过计算降水过程前后一定时间范围内的平均浓度来评估清除效果,对于粒径较小、数浓度日变化受环境状态影响较大的核模态难以准确体现,因此难以全面反映其在一次降水过程中受降水影响的动态变化.

这里选取 2023 年 5 月 16 日 16:00~5 月 17 日 16:00 之间发生的持续 18h 的降水事件作为典型降水个例,数据的时间分辨率从每小时(1h)调整为每10min,具体分析降水过程中阶段性环境变化(风速、降水、温度)对各模态浓度的影响,研究不同粒径气溶胶数浓度的变化特征.选择该时段的原因主要考虑该降水事件处于整个观测周期的中段,能够较好地代表观测期间的平均环境状态;该时段包含降水前后各3h,形成了完整的24h连续观测数据,便于对比非降水日的日变化趋势;该次降水前初始浓度(4220.86cm^{-3})处于常规范围(3000~5000cm^{-3})内,以减少因初始浓度过高或过低对分析结果的潜在影响.

图 8 为 5 月 16 日 16:00~17 日 16:00 的 24h 内站点气象要素变化,其中温度、气压、风速为逐10min平均值,降水为小时降水量.降水过程中平均温度为18.81℃,平均风速 0.26m/s,降水持续时间为 18h,总降水量为 41.6mm.根据降水强度分为 5 个阶段,即降水开始前、初期、中期、后期、结束后.阶段降水量先升高后降低.

图 9 为 5 月 16 日 16:00~17 日 16:00 的 24h 内 4 个模态浓度随时间的变化.粒径小于 0.1μm 的 M_1 与 M_2 在降水过程的前后 3h 内数浓度变化趋势具有较高的一致性.粒径大于 100nm 的 M_3 与 M_4 数浓度变化趋势也较为一致.粒径大于 0.03μm 的 M_2、M_3、M_4 在 16 日 22:00~17 日 00:00 数浓度显著提升.4 个模态浓度均在 17 日 00:00 后降低,其中 M_1 与 M_2 在 17 日 6:00 后逐渐上升,M_3 于 17 日 13:00 后逐渐上

升,M_4 则持续降低.

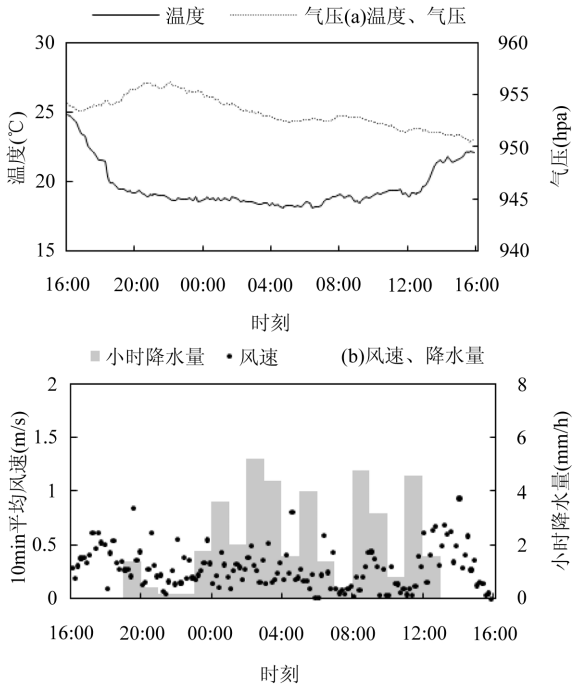


图 8 2023 年 5 月 16~17 日各环境要素随时间变化

Fig.8 Temporal variations of meteorological elements from May 16~17, 2023

时间分辨率为 10min

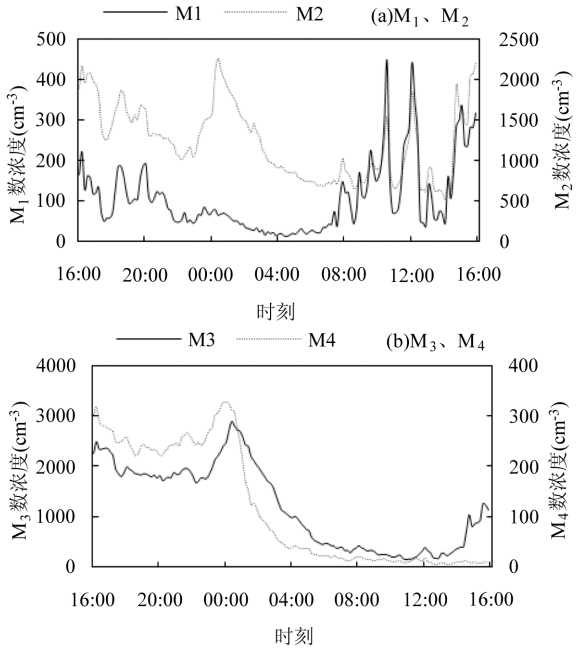


图 9 2023 年 5 月 16~17 日气溶胶各模态数浓度随时间变化

Fig.9 Temporal variations of aerosol particle number concentrations in different modes from May 16~17, 2023

时间分辨率为 10min

降水开始前 3h(16 日 16:00~18:50),环境气温快速下降约 4℃,相对湿度迅速提高,10min 平均风速先升高,再下降,在 17:00 达到最高,约 0.52m/s.这一阶段中,4 个模态的气溶胶数浓度均与风速呈现一定负相关性,其中 r_{M2} 为−0.4302 (P<0.1),这可能是由于降水发生前相对湿度升高,空气趋于饱和,较大粒子相比 M_1 模态更有利于在相对湿度较高的环境中吸湿凝结增长[42],发生沉降;而爱根核模态浓度则随着风速的增大而降低[43-44].

图 10 给出了降水不同阶段气溶胶各模态清除系数.降水过程初期(16 日 19:20~23:50)平均降水强度较弱,约 0.14mm/h. 4 个模态的清除率分别为 51.8%,17.8%,−13.2%和−27.2%(非降水日中同时段 4 个模态的浓度降低率分别为 40.6%,1.6%,−0.4%,−4.3%).本次降水过程前期阶段较弱的降水在一定程度上促进了凝结模态与液滴模态的浓度增加,而对 M_1 与 M_2 清除效果所有提高.

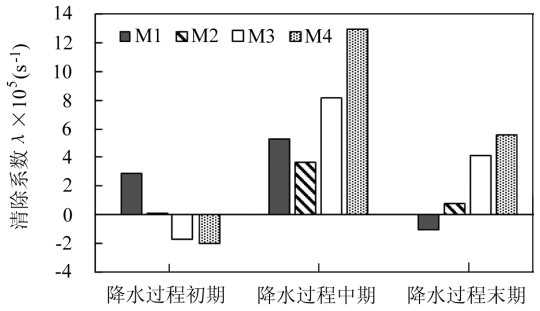


图 10 降水不同阶段气溶胶各模态清除系数

Fig.10 BWSC of different modes at distinct stages of rainfall

降水过程中期(17 日 00:00~05:50)平均降水强度较大,过程平均降水强度约 3.5mm/h,最大雨强达 5.2mm/h,各粒径气溶胶数浓度均显著下降,4 个模态的清除率分别为 64.2%,43.7%,74.8%和 91.5%,均高于非降水日日变化中同时段的数浓度的下降率(非降水日中同时段 4 个模态的浓度降低率分别为 53.8%,20.0%,10.2%,−4.2%),并且随着粒径增大,清除率的提升愈发明显.Jung 等[45]研究发现,在低降雨量情况下,清除过程主要受到扩散作用的影响;在高降雨量情况下,清除主要受拦截和碰撞的影响.本研究中,降水过程初期与中期相比,M_3 与 M_4 的清除率提升幅度显著高于 M_1 与 M_2,说明在较强降水下对粒径较大的模态清除率更明显.

降水过程末期(17 日 06:00~12:50)平均降水强

度相较日出前有所降低,约 2.4mm/h.这一阶段中,日出后温度逐渐升高,风速相较降水过程中期减弱.在这一阶段,M_1 数浓度与温度呈现一定相关性(r=0.3662, P<0.05).M_3 与 M_4 的数浓度变化率则与小时降水量呈现更一致的变化趋势.其中 08:00~09:00 降水增强,平均降水强度达 4mm/h,4 个模态于 9:00 均产生较明显的清除效果.在日出至正午的降水过程中,0.1μm 以下的粒子浓度回升可能与边界层抬升与人为活动(交通排放)增加有关[28].而在过程中雨强较大的时刻,4 个模态都会产生浓度的降低.

降雨结束后 3h(17 日 13:00~15:00)温度回升,相对湿度降低 4 %,环境气压降低,风速升高.M_1、M_2、M_3 数浓度发生一定回升.陈慧忠等[36]在对东莞地区降水后 $PM_{2.5}$ 浓度回升的粒径分析后发现,粒径 300~700nm 细粒子数浓度变化率较高,他们认为是降水结束后雨滴蒸发、小粒子释出再悬浮造成的.进一步对降水后 3h 与降水末期 3h 数浓度变化率进行分析,发现此次降水过程末期(17 日 11:00~15:50) 0.1μm 以下的粒子数浓度与风速变化呈现一定负相关(r=−0.4694,P<0.01);降水结束后风速逐渐降低,气温升高,M_1、M_2、M_3 浓度随温度升高而提升,而 M_4 浓度回升不明显,特别是超过 0.6μm 的粒子数浓度并未回升,说明随着温度上升,环境相对湿度降低,促进了细粒子蒸发再悬浮,而液滴模态体积相对较大,环境条件对其沉降的抑制与再悬浮机制相对不明显,所以数浓度较为稳定.降水结束后 0.3~0.6μm 范围内数浓度下降 5.7%,而粒径在 0.6~1μm 范围内的气溶胶数浓度降低约 31.3%,说明随着粒径增大,粒子的再悬浮效应减弱,吸湿沉降效应增强.

从上面的分析中可以看出,在黄山汤口站点 5 月 16~17 日降雨过程中,降雨强度由弱变强再减弱,不同阶段气象条件的差异性对不同粒径气溶胶清除率产生了影响.降水发生前 3h,小粒径气溶胶(<0.1μm)数浓度受风速变化影响较为明显.初期(16 日 19:00~23:00)降水强度较低(<1mm/h),弱降水对 M_1 与 M_2 的清除效果提升相对有限,并加剧了积聚模态(特别是凝结模态)的堆积现象.随着降水发展,降水中期(17 日 0:00~5:00)平均雨强达 3.5mm/h,4 个模态清除率随着粒径的增大而提升.降水后期(17 日 6:00~12:00) 随着日出后温度升高和降水减弱(2.4mm/h),粒径小于 0.1μm 的粒子数浓度可能因日出后边界层高度抬升以及人为活动产生的输送增加而提高,而较大粒径粒子受降水清除作用更为明显.降雨结束后(17 日 13:00~15:00),温度回升、相对湿度降低,小粒径气溶胶(0.01~0.3μm)浓度反弹较多,而更大粒径气溶胶(>0.6μm)受吸湿增长后的沉降效应,数浓度保持下降.

3　结论

3.1　黄山汤口站点降水日亚微米级气溶胶数浓度降低约 27.8%,其中粒径在 0.1~1μm 范围内的气溶胶数浓度降低 36.32%.随着粒径的增大,降水日 4 个模态数浓度降低率逐渐增高.

3.2　降水时长相近的情况下,平均雨强较大的小雨个例对 4 个模态均产生更好的清除效果,核模态在雨强较低的个例中产生负清除.大雨相比中雨各粒径范围内整体清除率较大;粒径在 0.1μm 以下的气溶胶粒子受总降水量差异影响较大,而粒径在 0.1μm 以上的气溶胶粒子清除率差异则较小,且均具有较高的清除率.

3.3　降雨前初始浓度较高的降水对应了更高的整体清除率,特别是对 0.03μm 以上的气溶胶粒子,较高的初始浓度对应更高的清除率,而对成核模态则可加剧负清除的效果.

3.4　降水持续时长对 0.3μm 以下的气溶胶清除率影响较大.随着粒径尺度的增加,不同降水时长的两次事件中,4 个模态清除率的差异在逐渐减小.这说明降水时长的差异对 0.1μm 以下特别是成核模态气溶胶数浓度的影响相较积聚模态更大.

3.5　降水过程不同阶段中,前期的弱降水可能会加剧积聚模态的堆积程度;中期雨强增加促进各粒径的清除效果,且随着粒径增大,清除率提升更明显;后期雨强降低,在日出后的降水中粒径小于 0.1μm 的粒子数浓度有所回升,而较大粒径粒子受降水清除作用更为显著;降水结束后,爱根核与凝结模态粒子数浓度回升较大,而粒径大于 0.6μm 的粒子数浓度保持下降.

参考文献：

[1] Thorsen J T, Ferrare A R, Kato S, et al. Aerosol direct radiative effect sensitivity analysis [J]. Journal of Climate, 2020,33(14):6119−6139.

[2] Xu W, Ovadnevaite J, Fossum K N, et al. Sea spray as an obscured source for marine cloud nuclei [J]. Nature Geoscience, 2022,15(4):

282−286.

[3] Chang D, Cheng Y, Reutter P, et al. Comprehensive mapping and characteristic regimes of aerosol effects on the formation and evolution of pyro−convective clouds [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015,15(18):10325−10348.

[4] Murray JB, Wilson WT, Dobbie S, et al. Heterogeneous nucleation of ice particles on glassy aerosols under cirrus conditions [J]. Nature Geoscience, 2010,3(4):233−237.

[5] DeMott P J, Hill T C J, McCluskey C S, et al. Sea spray aerosol as a unique source of ice nucleating particles [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015,113(21):5797−5803.

[6] Tang J W, Marr L C, Tellier R, et al. Airborne transmission of respiratory viruses including severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 [J]. Current Opinion in Pulmonary Medicine, 2023,29(3): 191−196.

[7] 覃旭菁,孔少飞,吴 剑,等.民用煤燃烧排放亚微米颗粒物数浓度粒径分布和排放因子 [J]. 中国环境科学,2025,45(2):593−605.
Qin X Q, Kong S F, Wu J, et al. Number concentration, particle size distribution and emission factors of submicron aerosols during domestic coal burning [J]. China Environmental Science, 2025,45(2): 593−605.

[8] 王静怡,李晓明.大气气溶胶浓度和粒度特征研究进展 [J]. 生态科学, 2024,43(5):200−206.
Wang J Y, Li X M. Research progress on properties of aerosol concentration and particle size in atmosphere [J]. EcologicalScience, 2024,43(5):200–206.

[9] 王 鑫,刘冬跃,钱松山,等.大气沉降对环境污染研究现状及进展 [J]. 北京水务, 2021,(2):16−20.
Wang X, Liu D Y, Qian S S, et al. Research progress of atmospheric deposition on environmental pollution [J]. Beijing Water, 2021,(2):16−20.

[10] 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, 2016,37(10):3686−3692.
Dong Q, Zhao P S, Chen Y N. Impact of collision removal of rainfall on aerosol particles of different sizes [J]. Environmental Science, 2016, 37(10):3686−3692.

[11] 邹长伟,黄 虹,杨 帆,等.大气颗粒物和气态污染物的降雨清除效率及影响因素 [J]. 环境科学与技术, 2017,40(1):133−140.
Zou C W, Huang H, Yang F, et al. Atmospheric particulate and gaseous pollutants removal efficiency by rainfall and the influencing factors [J]. Environmental Science & Technology, 2017,40(1):133−140.

[12] 栾 天,郭学良,张天航,等.不同降水强度对 $PM_{2.5}$ 的清除作用及影响因素 [J]. 应用气象学报, 2019,30(3):279−291.
Luan T, Guo X L, Zhang T H, et al. The scavenging process and physical removing mechanism of pollutant aerosols by different precipitation intensities [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2019,30(3):279−291.

[13] Zikova N ,Zdimal V. Precipitation scavenging of aerosol particles at a rural site in the Czech Republic [J]. Tellus: Series B, Chemical and Physical Meteorology, 2016,68(1):1−14.

[14] Moore A R, Hanlon R, Powers C, et al. Scavenging of sub−micron to micron−sized microbial aerosols during simulated rainfall [J]. Atmosphere, 2020,11(1):80.

[15] Jung C H, Lee S S, Bae S Y, et al. Minimum collection efficiency particle diameter during precipitation as a function of rain intensity [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2013,13:1070–1077.

[16] 许建明,高 伟,瞿元昊.上海地区降雨清除 $PM_{2.5}$ 的观测研究 [J]. 环境科学学报, 2017,37(9):3271−3279.
Xu J M, Gao W, Qu Y H. Observation of the wet scavenge effect of rainfall on $PM_{2.5}$ in Shanghai [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(9):3271−3279.

[17] 吴 进,孙兆彬,翟 亮,等.北京地区不同类型降水对气溶胶粒子的影响 [J]. 中国环境科学, 2018,38(3):812−821.
Wu J, Sun Z B, Zhai L, et al. Effects of different types of precipitation on aerosol particles in Beijing [J]. China Environmental Science, 2018, 38(3):812−821.

[18] 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.
Han Y, Xu H, Bi X H, et al. Changes of particulate matters during rain process and influence of that on chemical composition of precipitation in Hangzhou, China [J]. China Environmental Science, 2013,33(2): 193−200.

[19] Blanco A C, Calvo A I, Castro A, et al. Scavenging of submicron aerosol particles in a suburban atmosphere: The raindrop size factor. [J]. Environmental Pollution, 2021,285(525):117371.

[20] 向 欣,张立生,杨 琨,等.北京市大气细颗粒物污染时空分布特征及其降水清除影响 [J]. 环境污染与防治, 2022,44(10):1314−1317, 1361.
Xiang X, Zhang L S, Yang K, et al. Spatial and temporal distribution of fine particulate matter pollution and scavenging effect of precipitation in Beijing [J]. Environmental Pollution & Control, 2022,44(10):1314−1317,1361.

[21] 于人杰,康 平,任远刘瑞,等.成都市降水对大气颗粒物湿清除作用的观测研究 [J]. 环境污染与防治, 2020,42(8):990−995.
Yu R J, Kang P, Ren Y L R, et al. Observational study on precipitation wet removal of atmospheric particulate matter in Chengdu [J]. Environmental Pollution & Control, 2020,42(8):990−995.

[22] Haleem N, Kumar P, Uguz S, et al. Viability of artificial rain for air pollution control: Insights from natural rains and roadside sprinkling [J]. Atmosphere, 2023,14(12):1714.

[23] 宁海文.西安市大气污染气象条件分析及空气质量预报方法研究 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2006.
Ning H W. Analysis on meteorological factors and study on predicting air pollution in Xi'an City [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2006.

[24] 周广强,瞿元昊,高 伟,等.云下湿清除作用对长三角 $PM_{2.5}$ 模拟的影响 [J]. 中国环境科学, 2020,40(7):2794−2801.
Zhou G Q, Qu Y H, Gao W, et al. Simulated impact of blow−cloud wet scavenging on $PM_{2.5}$ over the YRD. [J]. China Environmental Science, 2020,40(7):2794−2801.

[25] 李 力.黄山地区云凝结核与气溶胶化学成分的特性及其关系 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2015.
Li L. The properties and relationship of cloud condensation nuclei and aerosol chemical composition at Huangshan [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2015.

[26] John W, Wall S M, Ondo J L, et al. Modes in the size distributions of

atmospheric inorganic aerosol [J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1990,24(9):2349−2359.

[27] Laakso L, Grönholm T, Rannik Ü, et al. Ultrafine particle scavenging coefficients calculated from 6 years field measurements [J]. Atmospheric Environment, 2003,37(25):3605−3613.

[28] 陈潇潇,金莲姬,朱靖民.黄山山底大气气溶胶数浓度日变化 [J]. 中国环境科学, 2013,33(7):1167−1173.
Chen X X, Jin L J, Zhu J M. Daily variation of atmospheric aerosol number concentrations at the foot of Mount Huangshan. [J]. China Environmental Science, 2013,33(7):1167−1173.

[29] RoldánH N, Hoyos C D, HerreraM L, et al. An investigation of the precipitation net effect on the particulate matter concentration in a narrow valley [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2020,59(3):401−426.

[30] 马双良,黄腾跃,王　楠,等.郑州市降水过程对颗粒物湿沉降的影响 [J]. 干旱环境监测, 2018,32(4):170−175.
Ma S L, Huang T Y, Wang N, et al. Effect of precipitation process on wet deposition of particulate matter in Zhengzhou City [J]. Arid Environmental Monitoring, 2018,32(4):170−175.

[31] 吴　玥,林惠娟,曾　晨,等.降水和风对苏州地区 $PM_{2.5}$ 浓度影响分析 [J]. 环境监控与预警, 2024,16(3):86−90.
Wu Y, Lin H J, Zeng C, et al. Analysis on the Influence of Precipitation and Wind on $PM_{2.5}$ Concentration in Suzhou [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2024,16(3):86−90.

[32] 林　丹,王维佳,郭建平,等.降水对四川盆地细颗粒物的清除作用分析 [J]. 气象与环境科学, 2023,46(5):67−74.
Lin D, Wang W J, Guo J P, et al. Scavenging effect of precipitation on removal of fine particles in Sichuan Basin [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2023,46(5):67−74.

[33] 韩力慧,王红梅,向　欣,等.北京市典型区域降水特性及其对细颗粒物影响 [J]. 中国环境科学, 2019,39(9):3635−3646.
Han L H, Wang H M, Xiang X, et al. The characteristics of precipitation and its impact on fine particles at a representative region in Beijing [J]. China Environmental Science, 2019,39(9):3635−3646.

[34] 童　俊,孟旭芹,孟　凯,等.承德市降水对细颗粒物和可吸入颗粒物的清除作用分析 [J]. 环境污染与防治, 2023,45(3):357−362.
Tong J, Meng X Q, Meng K, et al. Scavenging effect analysis of precipitation on $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Chengde [J]. Environmental Pollution & Control, 2023,45(3):357−362.

[35] 周　彬,刘端阳,魏建苏,等.降水对气溶胶颗粒物清除作用的初步分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2015,24(S1):160−170.
Zhou B, Liu D Y, Wei J S, et al. A preliminary analysis on scavenging effect of precipitation on aerosol particles [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015,24(S1):160−170.

[36] 陈慧忠,吴　兑,袁志扬.东莞地区 $PM_{2.5}$ 湿清除的观测研究 [J]. 环境科学学报, 2021,41(5):1741−1752.
Chen H Z, Wu D, Yuan Z Y. Observational study of $PM_{2.5}$ scavenging by rain in Dongguan [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021,41(5):1741−1752.

[37] 栾兆鹏,卢慧超,李　恬,等.降水和风对泰安地区 $PM_{2.5}$ 浓度的影响及区域传输研究 [J]. 气象与环境学报, 2021,37(3):33−39.
Luan Z P, Lu H C, Li T, et al. Impacts of precipitation and wind on $PM_{2.5}$ concentration and its regional transport in Tai'an [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2021,37(3):33−39.

[38] 韩力慧,兰　童,程水源,等.唐山市大气颗粒物和 O_3 多尺度变化及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2024,44(3):1185−1194.
Han L H, Lan T, Cheng S Y, et al. The variations and influencing factors of atmospheric particulate matter and O_3 at multiple scales in Tangshan [J]. China Environmental Science, 2024,44(3):1185−1194.

[39] 郑飒飒,王维佳,刘东升,等.四川盆地降水对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的清除作用分析 [J]. 暴雨灾害, 2024,43(5):607−616.
Zheng S S, Wang W J, Liu D S, et al. Scavenging effect analysis of precipitation on $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Sichuan Basin [J]. Torrential Rain and Disasters, 2024,43(5):607−616.

[40] 周国治,潘海婷.长沙市秋冬季降水对 $PM_{2.5}$ 的影响分析 [J]. 四川环境, 2020,39(6):53−58.
Zhou G Z, Pan H T. Analysis on the influence of precipitation on $PM_{2.5}$ in Changsha City during autumn−winter period [J]. Sichuan Environment, 2020,39(6):53−58.

[41] 范　凡,陆　尔,葛宝珠,等.降水对江浙沪 $PM_{2.5}$ 的清除效率研究 [J]. 气象科学, 2019,39(2):178−186.
Fan F, Lu E, Ge B Z, et al. Analysis on scavenging effect of precipitation on $PM_{2.5}$ in Jiangsu, Zhejiang and Shanghai area [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2019,39(2):178−186.

[42] 吴奕霄,邱阳阳,郭　俊,等.不同海拔高度气溶胶粒子吸湿特征的观测研究——以黄山为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2018,27(6):1361−1370.
Wu Y X, Qiu Y Y, Guo J, et al. An Observational Study on the hygroscopic properties of aerosol particles at different altitudes: acase study in the Mt. Huangshan [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018,27(6):1361−1370.

[43] 王　振.南京北郊大气气溶胶数谱分布及来源解析 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2015.
Wang Z. Number size distribution and source apportionment of atmospheric aerosols in Northern suburb of Nanjing [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2015.

[44] 郎凤玲,闫伟奇,张　泉,等.北京大气颗粒物数浓度粒径分布特征及与气象条件的相关性 [J]. 中国环境科学, 2013,33(7):1153−1159.
Lang F L, Yan W Q, Zhang Q, et al. Size distribution of atmospheric particle number in Beijing and association with meteorological conditions [J]. China Environmental Science, 2013,33(7):1153−1159.

[45] Jung W, Sung H M, You C H, et al.Relationships between Aerosol and Raindrop Size Distributions during Rainfall Period (Changma) in Jeju Island, Korea [J]. Atmosphere, 2022,13(6):933−933.

作者简介：张泽宇(2001−),男,江苏南京人,南京信息工程大学硕士研究生,主要从事大气环境污染物与云降水相互作用研究.202312030039@nuist.edu.cn.