

降水和风对苏州地区 $PM_{2.5}$ 浓度影响分析

吴玥, 林惠娟*, 曾晨, 曹舒娅, 韦芬芬
(苏州市气象局, 江苏 苏州 215131)

摘要: 为了解降水和风对苏州地区细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 质量浓度的影响, 利用 2018—2022 年逐日降水量、风向风速和环境空气质量数据, 分析苏州市降水和 $\rho(PM_{2.5})$ 的月变化特征及日降水强度、降水时长和风向风速对 $\rho(PM_{2.5})$ 变化的作用。结果表明, 降水对 $PM_{2.5}$ 存在一定湿清除作用, 全年雨日 $\rho(PM_{2.5})$ 平均值较非雨日低 21%, 1—2 月和 11—12 月最为显著。降水的湿清除效率受日降水量级和日降水时长等因素的影响, 当日降水量达到中雨及以上量级时, $\rho(PM_{2.5})$ 下降样本数超过总样本数的 60%, 降水的湿清除效率随着降水量级的增加而显著提高; 当日降水时长 > 6 h 时, 降水对污染物浓度的改善作用明显, $\rho(PM_{2.5})$ 下降样本数超过总样本数的 50%。不同风向、风速的清除作用也有差异, 静风或微风状态下, 高温高湿的西南风最易造成苏州地区的霾污染; 当西北风速 > 4 m/s 时, 受到冷锋前的污染气团南下扩散影响, $\rho(PM_{2.5})$ 升高; 对于东北风、西南风和东南风这 3 个风向, 当风速达到 5 m/s 时, 对污染物具有有效的干清除作用。

关键词: 细颗粒物; 降水; 风; 苏州

中图分类号: P426.6; P425; X513

文献标志码: B

文章编号: 1674-6732(2024)03-0086-05

Analysis on the Influence of Precipitation and Wind on $PM_{2.5}$ Concentration in Suzhou

WU Yue, LIN Huijuan*, ZENG Chen, CAO Shuya, WEI Fenfen
(Suzhou Meteorological Bureau, Suzhou, Jiangsu 215131, China)

Abstract: In order to understand the impacts of precipitation and wind on $PM_{2.5}$ concentration in Suzhou, daily data of precipitation, wind and air quality from 2018 to 2022 are used to analyse monthly variation characteristics of precipitation and $PM_{2.5}$ concentration in Suzhou and the effects of daily precipitation intensity, duration, wind direction and speed on $PM_{2.5}$ concentration. The results indicate that precipitation has a certain wet removal effect on $PM_{2.5}$. Average concentration of $PM_{2.5}$ in rainy days throughout the year is 21% lower than that in non-rainy days, with the most significant effects in January, February, November and December. The magnitude and duration of daily precipitation affects its wet removal efficiency. When the magnitude of daily precipitation reaches the level of moderate rain or above, the number of samples of $\rho(PM_{2.5})$ decreases more than 60% of the total number of samples, and the wet removal efficiency of precipitation significantly increases with the increase of the level. When precipitation duration exceeds 6 hours, the improvement effects on pollutant concentration is significant, with the number of samples of $\rho(PM_{2.5})$ decreases more than 50% of the total number of samples. The clearance effect of different wind directions and wind speeds also varies. Southwest wind with high temperature and humidity is most likely to cause haze pollution in Suzhou in the case of low wind speed. When the northwest wind speed exceeds 4 m/s, $PM_{2.5}$ concentration increases due to the southward diffusion of polluted air masses in front of the cold front. For the other three wind directions, namely, northeast, southwest, and southeast, it has an effective dry cleaning effect on pollutants when wind speed exceeds 5 m/s.

Key words: $PM_{2.5}$; Precipitation; Wind; Suzhou

近几年来,随着经济发展迅速、城市化进程加快,空气污染问题对提升人民生活水平产生了严重

影响并引起广泛关注^[1]。大气中霾污染主要受排放源和气象因素影响^[2-3],随着治理力度不断加

收稿日期: 2023-07-11; 修订日期: 2023-12-10

基金项目: 江苏省气象局科研项目(KQ202320); 苏州市气象局科研项目(SZKJ202201)

作者简介: 吴玥(1994—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事大气环境研究, 城市气象服务工作。

* 通讯作者: 林惠娟 E-mail: lhj_linda@163.com

强,排放源得到有效控制,因此有更多学者开始关注气象因素对污染物浓度的影响^[4]。研究表明,气温、相对湿度、气压、降水、风等气象要素均会影响细颗粒物(PM_{2.5})浓度变化^[5-6],其中降水和风分别影响 PM_{2.5} 的湿清除和干清除过程,是重污染条件下影响空气质量的重要气象要素^[7]。

降水对污染物的湿清除作用,维持着大气中气溶胶粒子源、汇之间的平衡,是大气自净的最重要过程之一。大气气溶胶粒子的湿清除是指气溶胶粒子被大气凝结物清除并最终降落到地面的过程,包括云内清除和云下清除 2 个阶段。其中,云下清除是指雨滴(或其他降水粒子)在降落过程中通过布朗扩散、惯性碰并等过程捕获气溶胶粒子使之从大气中清除^[8]。湿清除的机制非常复杂,其影响过程受粒子谱、雨滴谱、雨滴下落末端速度、粒子荷电数等因素影响^[9-11]。一些学者对不同强度降水进行分类研究,发现小雨的清除能力较弱^[3-4,12];另有学者通过观测发现,对于粗颗粒物而言,湿清除效率与雨滴大小无关^[13],当气溶胶直径超过 2.2 μm 时更容易被湿清除^[14]。此外,降水的清除能力还受到季节、降水时间等多种因素影响,其影响机制目前还不是很确定。不同风向、风速对 PM_{2.5} 粒子的扩散也有明显影响,已有研究表明,风对 PM_{2.5} 质量浓度的影响并不是简单的线性关系^[15-16],其影响机制仍不明确,风向、风速对我国东部区域 PM_{2.5} 质量浓度影响的研究也相对较少。

尽管近年来已有学者研究了降水和风对 PM_{2.5} 浓度的影响,但大多为短时间序列个例,缺乏长期观测研究。本研究基于近 5 年苏州市的气象与环保观测数据,分析降水和风对 PM_{2.5} 质量浓度的影响,以期为提高 PM_{2.5} 浓度预报能力和区域大气污染人工干预提供参考。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

苏州属于亚热带季风气候,全年雨量丰沛。2018—2022 年平均降水量为 1 275.5 mm,降水主要集中在 6—9 月,降水量占全年的 54.6%,其他月份降水量较为均匀。各月份降水日数差异不明显,其中春季和夏季降水日数略偏多,秋、冬季偏少。降水量级具有明显的季节差异,全年降水以小雨量级为主,小雨日占总降水日数的 71.4%,冬季几乎

很少出现大雨及以上量级,暴雨及以上降水则集中出现在 6—9 月。

1.2 数据来源

采用 2018—2022 年苏州基本气象站(站号:58349)逐日降水和风观测数据,以及同期苏州市区国控点逐日 ρ(PM_{2.5})均值观测数据。

1.3 资料处理

首先,利用近 5 年 ρ(PM_{2.5})与降水量月度数据,分析长时间序列累计降水量对 ρ(PM_{2.5})月平均值的影响;其次,对降水日的降水量及降水时长进行统计,分析日降水强度和降水时长对 ρ(PM_{2.5})日平均值的变化影响;最后,对逐日的风向、风速和 ρ(PM_{2.5})数据进行匹配,分析风对 ρ(PM_{2.5})日平均值的变化影响。

2 结果与分析

2.1 苏州地区降水及 PM_{2.5} 质量浓度分布特征

2018—2022 年苏州地区 ρ(PM_{2.5})平均值为 38.2 μg/m³。2018—2022 年苏州地区降水及 ρ(PM_{2.5})逐月变化见图 1。由图 1 可见,ρ(PM_{2.5})高值主要出现在 1 月和 11—12 月,2 月开始,ρ(PM_{2.5})逐月降低,全年质量浓度最低值出现在 8 月。ρ(PM_{2.5})月平均值和月平均降水量的相关系数为 -0.71,呈显著负相关,表明苏州地区的降水对 PM_{2.5} 具有一定的湿清除作用。ρ(PM_{2.5})月平均值和月平均降水日数的相关系数为 -0.03,其中和大雨级及以上降水日数的相关系数为 -0.74,说明一定量级以上的降水才能够对 PM_{2.5} 进行有效的湿清除,不同量级降水的湿清除效率将在后文进行讨论。

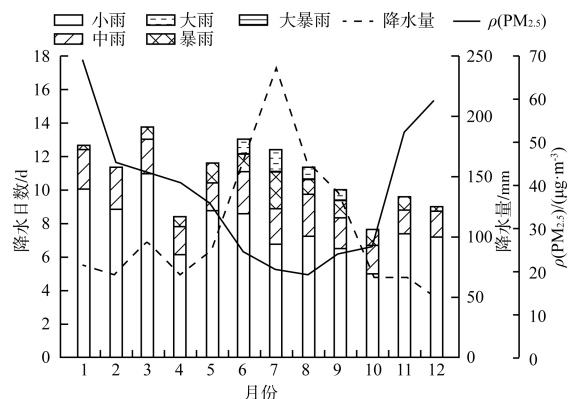


图 1 2018—2022 年苏州地区降水及 ρ(PM_{2.5}) 逐月变化

2.2 降水日和非降水日 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化

2018—2022 年苏州地区不同降水等级 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 逐月变化见图 2。由图 2 可见,各月份降水日的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值均低于非降水日,全年雨日 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值比非降水日低 21%。1—2 月和 11—12 月 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 受降水影响最为显著,其中,1 月降水日 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值较非降水日下降 20%,2 月下降 36%,11 月和 12 月分别下降 22% 和 35%。由此可见,苏州地区降水对 PM_{2.5} 具有显著的湿清除作用,尤其在秋冬季节。6—8 月降水日的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 较非降水日下降约 15%,低于上述月份,这可能与 PM_{2.5} 初始质量浓度较低有关系^[4,7]。但注意到,3 月小雨日的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值略高于非降水日,可能是由于弱降水增加了大气相对湿度,使粒子吸湿性增长作用增强,导致污染物浓度增加。从降水量级方面来看,小雨、中雨和大雨降水日的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值较非降水日分别下降 11%,39% 和 59%,这表明降水的湿清除效率随着降水量级的增加而显著提高。

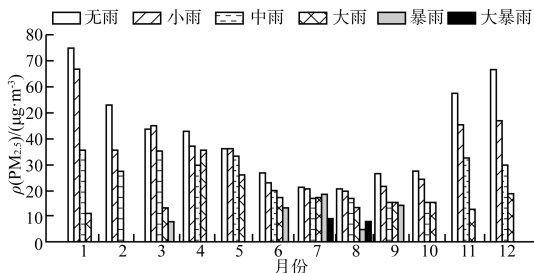


图 2 2018—2022 年苏州地区不同等级降水 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 逐月变化

2.3 降水强度对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的影响

为进一步揭示苏州地区降水强度对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响,利用 2018—2022 年逐日降水量和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 数据,计算出不同降水量级对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在降水前后的平均改变率,得到表 1。由表 1 可见,质量浓度下降样本数为 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日平均值较前一日下降的总日数;质量浓度下降概率为质量浓度下降样本数占总样本数的比例;质量浓度平均值为相应降水量级总日数的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值;质量浓度平均改变率为 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 下降样本日中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值相较于质量浓度平均值的变化。

日降水量和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 相关系数为 -0.16,呈负相关。由表 1 可见,当日降水量达到大雨及以上

量级时, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 明显较低, $<20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。当日降水量达到中雨及以上量级时,会对 PM_{2.5} 产生显著的湿清除效应,有超过 60% 的样本会出现质量浓度下降,且下降幅度超过 20% (质量浓度平均改变率为负值,且绝对值 $>20\%$)。王妮等^[17] 研究发现,当日降水量 $>5 \text{ mm}$ 时,降水对大气污染物普遍具有湿清除作用。值得注意的是,在小雨日时,虽然有 43.5% 的样本出现了质量浓度下降的情况,但相对前一天的平均质量浓度不降反升 (质量浓度平均改变率为正值)。有学者认为,小雨时并不能有效去除空气中的污染物,相反,降水导致近地面空气相对湿度增加,加剧二次粒子在高湿环境下的形成和累积,使 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 增加^[18]。周国治等^[19] 发现日降水量在 0.1~1 mm 时,微粒子的吸湿性增长作用是最强的, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 增加也是最为明显的。另外,许建明等^[3] 根据天气形势分析指出,小雨日相比于无降水日气温相对较低,近地面风场辐合,有利于周边地区 PM_{2.5} 聚集,同时由于有利降水形势场较弱,高低空垂直混合作用并不强,不利于污染物垂直扩散,也是造成弱降水时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 增加的可能原因之一。

表 1 2018—2022 年日降水量与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 统计

项目	无雨	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨
总样本数/d	1 172	467	119	51	14	3
质量浓度下降样本数/d	504	203	76	31	10	3
质量浓度下降概率/%	43.0	43.5	63.9	60.8	71.4	100.0
$\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	41.2	36.6	25.0	17.8	14.3	8.4
浓度平均改变率/%	2.1	2.4	-24.9	-23.7	-22.3	-34.5

2.4 降水时长对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的影响

大气污染物质量浓度的变化除了与降水强度有关外,还和降水持续时间有关。依据日降水时长 (H) 对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响,将其划分为 $H=0$, $0 < H \leq 6 \text{ h}$, $6 \text{ h} < H \leq 12 \text{ h}$ 和 $H > 12 \text{ h}$ 这 4 种情况,用以考察降水时长对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的影响。2018—2022 年日降水时长与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 统计见表 2。

由表 2 可见,只要有降水发生,无论日降水时长长短, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值总是低于无降水时的平均质量浓度,其中 $H > 12 \text{ h}$ 时, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 仅为 $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$,

远低于年平均值,这充分说明了降水对污染物质量浓度的改善作用。考察 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的变化情况发现,以 6 h 为界,当 $H > 6 \text{ h}$ 时, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值呈下降趋势,且下降的样本数超过 50%,表明 6 h 以上的降水时长对 PM_{2.5} 具有良好的清除作用。当 $0 < H \leq 6 \text{ h}$ 时, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值升高 3.5%,质量浓度下降概率为 44.4%,上升概率为 55.6%,即超过 50% 的样本均有所升高,说明在降水时长较短的情况下,PM_{2.5} 的清除作用相对有限,且由于降水时间短,雨水蒸发增加近地面相对湿度,在一天时间内有较长的时间进行二次反应,从而使 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 增加。

表 2 2018—2022 年日降水时长与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 统计

项目	$H=0$	$0 < H \leq 6 \text{ h}$	$6 \text{ h} < H \leq 12 \text{ h}$	$H > 12 \text{ h}$
总样本数/d	1 172	351	200	97
质量浓度下降样本数/d	504	156	103	64
质量浓度下降概率/%	43.0	44.4	51.5	66.0
$\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	41.2	35.8	30.6	24.0
质量浓度平均改变率/%	2.1	3.5	-9.2	-24.2

2.5 风对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的影响

大气中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 不仅受到降水的影响,也会受到风向和风速的影响。2018—2022 年苏州地区不同风向、风速和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的关系见图 3。由图 3 可见,在静风条件下,除了东北风向,其余 3 个风向 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均 $> 70 \mu\text{g}/\text{m}^3$,其中西南风向 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最高,达到轻度污染程度,这可能是由于西南风温度高、湿度大,同时在静风或微风状态下,有利于大气中 PM_{2.5} 粒子在本地的生成和聚集^[20]。随着风速的增加,除了西北风向外,其余 3 个风向 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均呈现下降趋势,当风速 $> 5 \text{ m/s}$ 时,东北风、西南风和东南风向的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均降至 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下,环境空气质量等级为优,其中西南风的清除效率最高,这是因为西南风一般在雨季盛行,随着西南风的增大,会带来显著的降水,湿清除作用导致 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 降低;而东北风向清除效率最低,对苏州地区来说,东北风一般是来自海上的清洁气团,污染物基础浓度相对较低,这也是静风时东北风向 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最低的可能原因。值得注意的

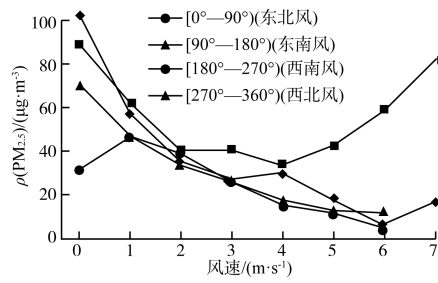


图 3 2018—2022 年苏州地区不同风向、风速和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的关系

是,当西北风向风速 $> 4 \text{ m/s}$ 时,会出现 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 升高的现象,分析后发现这种情况一般出现在冬季和初春,当冷锋南下时,前沿扩散的冷空气会带来北方污染气团,传输作用的加剧使得本地 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 升高。

为进一步理解西北风向 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 升高的现象,选取苏州地区 2018—2022 年内持续时间达 3 d 及以上的最严重的 2 段污染时期,其中 2020 年 1 月 12—14 日, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为 $229 \mu\text{g}/\text{m}^3$,2020 年 12 月 10—13 日, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为 $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$,分别进行 120 h 后向轨迹聚类分析[图 4(a)(b)]。由图 4 可见,2 次典型的持续性污染

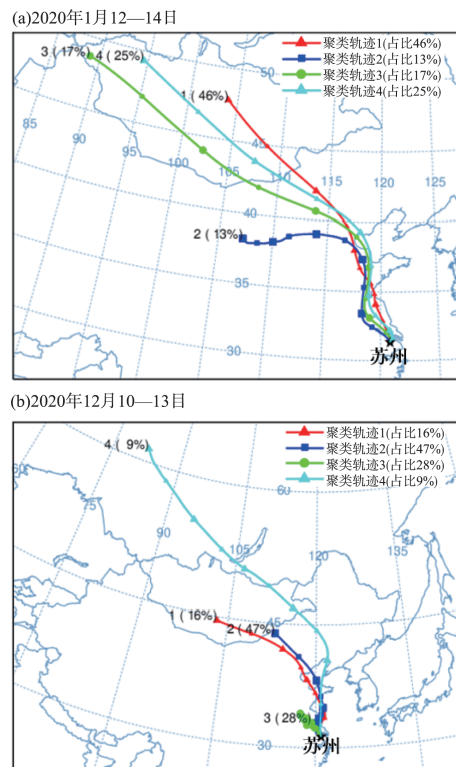


图 4 2020 年 1 月 12—14 日、12 月 10—13 日 120 h 气团后向轨迹聚类分析

过程的主导风向均为北到西北风。结合天气形势分析,2 次污染过程环境背景相似,前期受地面高压控制,天气静稳,污染物沉降堆积后形成污染;污染过程的最后一天有冷空气南下,在冷锋前西北风的传输作用下,重污染区域逐渐南移,也就是说,西北风速的增大反而使 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 增加。

3 结论

(1) 根据近 5 年苏州地区月均降水量及 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值分析,全年降水日 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值比非降水日低 21%,其中 1—2 月和 11—12 月降水对 PM_{2.5} 的湿清除作用最为显著,小雨、中雨和大雨及以上量级的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值较非降水日分别下降 11%,39% 和 59%。

(2) 湿清除效率与日降水量级和日降水时长等因素有关, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值与日降水量和降水时长均呈弱的负相关。小雨日时,粒子的吸收增长使 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值不降反升;当日降水量级进一步增加时,降水对污染物浓度的改善作用随之显著提高。日降水时长在 0~6 h 时,粒子浓度增长;日降水时长超过 6 h 后,湿清除效率随着降水时长的增加而明显提高。

(3) 静风或微风状态下,西南风向下 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值最高,可能是由于其高温、高湿的特性有利于 PM_{2.5} 粒子的生成。西北风向下 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值最高,风速 >4 m/s 后, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 显著升高,可能与冷空气南下导致北方污染物向南输送有关;对于东北风、西南风和东南风向这 3 个风向,当风速 >5 m/s 时, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值可降至 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下,环境空气质量等级为优。

[参考文献]

- [1] 李岳,殷宝辉,耿春梅,等. 武清地区冬季一次重污染过程垂直分布特征[J]. 环境科学研究,2019,32(6):1012-1019.
- [2] 李启勇,朱余,魏桢,等. 合肥市冬季灰霾天气 PM_{2.5} 源解析[J]. 环境监控与预警,2019,11(3):12-18.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] HAN T T, QIAO L P, ZHOU M, et al. Chemical and optical properties of aerosols and their interrelationship in winter in the megacity Shanghai of China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, 27: 59-69.
- [6] JONES J M, DAVIES T D, DORLING S R. Assessment of the use of principal components analysis to relate air and precipitation chemistry to climate [J]. Water, Air and Soil Pollution, 1995, 85(3): 1569-1574.
- [7] 于彩霞,邓学良,石春娥,等. 降水和风对大气 PM_{2.5}, PM₁₀ 的清除作用分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(12): 4620-4629.
- [8] 秦瑜,赵春生. 大气化学基础 [M]. 北京:气象出版社,2003.
- [9] WANG P K, GROVER S N, PRUPPACHER H R. On the effect of electric charge on the scavenging of aerosol particles by clouds and small raindrops [J]. Journal of The Atmospheric Sciences, 1978, 35: 1735-1743.
- [10] HERBERT F, BEHANG K D. Scavenging of airborne particles by collision with water drops-model studies on the combined effect of essential microdynamic mechanisms [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 1986, 35: 201-211.
- [11] MIRCEA M, STEFAN S, FUZZI S. Precipitation scavenging coefficient: influence of measured aerosol and raindrop size distributions [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(29): 5169-5174.
- [12] 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.
- [13] 蒲维维,赵秀娟,张小玲. 北京地区夏末秋初气象要素对 PM_{2.5} 污染的影响 [J]. 应用气象学报, 2011, 22(6): 716-723.
- [14] PRANESHA T S, KAMRA A K. Scavenging of aerosol particles by large water drops: Washout coefficients, half-lives, and rainfall depths [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D20): 23947-23953.
- [15] 常炉予,赵天良,何金海,等. 周边气象条件对南京城区大气污染物浓度的影响 [J]. 气象与环境学报, 2013, 29(6): 95-101.
- [16] 江鸿,柳戊弼,张翠荣,等. 2015 年武汉市 PM_{2.5} 变化特征及其与气象要素的关系 [J]. 安徽农业科学, 2016, 44(20): 190-191.
- [17] 王妮,何太蓉,刘金萍. 重庆城区夏季降水对大气污染物的湿清除效果分析 [J]. 环境工程, 2017, 35(4): 69-73.
- [18] QU Y W, GUO B B, CAI G Q, et al. The washing effect of precipitation on particulate matter and the pollution dynamics of rainwater in downtown Beijing [J]. Science of The Total Environment, 2015, 505: 306-314.
- [19] 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.
- [20] 孙兆彬,李梓铭,廖晓农,等. 北京大气热力和动力结构对污染物输送和扩散条件的影响 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1693-1705.