

樊高峰,马浩,任律,等,2017.分钟降水量对能见度及 PM_{2.5}浓度影响研究[J].气象,43(12):1527-1533.

分钟降水量对能见度及 PM_{2.5}浓度影响研究^{*}

樊高峰 马浩 任律 肖晶晶

浙江省气候中心,杭州 310017

提 要: 为清楚认识降水对能见度及 PM_{2.5}浓度的影响,以杭州为例,采用 2014—2015 年逐分钟气象观测资料,对比分析了不同降水条件下能见度及 PM_{2.5}浓度的分布特征,建立了不同强度降水影响能见度及 PM_{2.5}浓度的定量关系。研究结果表明降水量大小及持续时间对能见度与 PM_{2.5}浓度有明显作用,不仅持续稳定的降水过程能够造成持续的低能见度,突发性强降水更能造成能见度大幅降低;降水与能见度之间关系符合幂函数分布特征,能见度随降水量增加从快速下降过渡到慢速下降,中间存在一个拐点。降水对 PM_{2.5}的清除作用受降水量及降水前 PM_{2.5}浓度大小共同作用,降水对 PM_{2.5}的清除作用在降水较小并持续时,会造成 PM_{2.5}浓度的缓慢下降;而强降水过程对 PM_{2.5}的清除作用十分明显,降水量、PM_{2.5}浓度、能见度三者之间表现出基本一致的同步变化。基于降水量与降水前 PM_{2.5}浓度两个因子,采用非线性拟合方案构建了降水影响 PM_{2.5}浓度的定量统计模型,拟合结果与实况较为吻合,说明模型抓住了降水情景下影响 PM_{2.5}浓度变化的关键因子。最后针对研究中存在的不足和未来值得进一步发掘的科学问题进行了讨论。

关键词: 降水,大气能见度,PM_{2.5},非线性拟合

中图分类号: P426,P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.12.008

Impact of Precipitation on Atmospheric Visibility and the PM_{2.5} Concentration Based on the Minute-Scale High-Resolution Observations

FAN Gaofeng MA Hao REN Lü XIAO Jingjing

Zhejiang Climate Centre, Hangzhou 310017

Abstract: To explicitly investigate the influence of precipitation on visibility and PM_{2.5} concentration, minute-scale observations of Hangzhou during 2014—2015 are used to comparatively analyze the distribution characteristics of visibility and PM_{2.5} concentration under different levels of precipitation, and, furthermore, the quantitative impacts of precipitation with different intensities on visibility and PM_{2.5} concentration are studied. The results indicate that the intensity and duration of precipitation can significantly modulate visibility and PM_{2.5} concentration. Consistent and stable rainfall are easy to trigger long low-visibility scenario, and the sudden heavy precipitation is an important factor inducing the sharp-decrease of visibility. With the rise of rainfall, the visibility changes from rapid-decline to slow-decline and there exists an inflection point. The removing effect of precipitation on PM_{2.5} concentration can be mediated by the intensity of rainfall and the PM_{2.5} concentration before raining. When there is modest/small rainfall, the removing effect usually occurs several time later. However, heavy precipitation is able to remove PM_{2.5} quickly. Basically, synchronous changes among precipitation, PM_{2.5} concentration and visibility can appear. Based on the two factors of precipitation intensity and PM_{2.5} concentration before raining, a quantitative statistical

^{*} 浙江省自然科学基金项目(LQ14D050001)、中国气象局预报预测核心业务发展专项(CMAHX20160703)和浙江省科技厅重点项目(2014C23004)共同资助

2017 年 1 月 2 日收稿; 2017 年 8 月 24 日收修定稿

第一作者:樊高峰,主要从事气候监测诊断分析、气候变化研究. Email: fangaofeng@163.com

model reflecting the influence of rainfall on $PM_{2.5}$ concentration is constructed with the non-linear fitting technology, and the modeling results agree well with observations. Finally, the existing limitations and some scientific issues which need further exploring in the future are discussed.

Key words: precipitation, atmospheric visibility, $PM_{2.5}$, non-linear fitting

引言

大气能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度是反映大气透明度的重要物理量(马雁军等, 2005; 2012)。长期以来, 对影响能见度与 $PM_{2.5}$ 的物理因子的研究主要集中在大雾、沙尘暴等低能见度现象的观测与数值模拟等(Fu et al, 2006; 2008; Chang et al, 2009; 曹伟华等, 2013; 蔡子颖等, 2014; 王天舒和牛生杰, 2017; 于庚康等, 2015; 王继康等, 2017), 能见度受 $PM_{2.5}$ 及多种气象要素的综合影响(Fu et al, 2006; 2008; Chang et al, 2009; 白永清等, 2016; 曹伟华等, 2013), $PM_{2.5}$ 的起伏变化同样受天气系统的制约(Kim et al, 2006; 吴兑等, 2007; 张小曳, 2007; 蒲维维等, 2011; Zhang et al, 2012; 宋连春等, 2013; 王海畅等, 2015)。降水通过影响能见度而成为对交通等影响巨大的因素(吴建军等, 2010; Zhang and Cao, 2015), 受降水粒子类型、密度、速度、大小等多种因素影响, 降水与能见度关系并不唯一确定, 降水对能见度影响与降水粒子特征和谱分布有关(刘西川等, 2010; 舒小健等, 2017)。同时降水也对 $PM_{2.5}$ 的清除有重要影响(彭红和秦瑜, 1992; 刘西川等, 2010), 惯性碰撞是降水对气溶胶的主要清除方式, 对于粒径大于 $2 \mu m$ 的气溶胶粒子, 直接碰撞清除作用明显, 而对于小于 $2 \mu m$ 气溶胶的清除作用受降水形态不同, 清除作用复杂(董群等, 2016)。受原观测精度限制, 降水对能见度及 $PM_{2.5}$ 影响的机理研究相对比较缺乏, 且降水、能见度及 $PM_{2.5}$ 区域特征差异较大。本文以杭州为例, 利用逐分钟高分辨率资料开展降水对能见度及 $PM_{2.5}$ 影响研究, 揭示其中的定量影响关系, 为能见度及 $PM_{2.5}$ 浓度预报预警及应对提供参考。

1 资料和方法

数据质量是本研究中最基础也是最重要的一环。本文挑选了浙江省境内气象观测质量较高的杭州国家气候观象台观测资料作为分析对象, 杭州位

于长三角南部, 具有较好的区域代表性。本文选取杭州 2014 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日逐分钟观测资料, 包括降水量、能见度、 $PM_{2.5}$ 浓度、相对湿度和气温等, 去除缺测及异常值后资料完整率达到 98% 以上。在实际观测中, 能见度观测仪器为 HY-35P 前向散射式能见度仪, 降水采用 SL3-1 型双翻斗雨量计, $PM_{2.5}$ 观测仪器主要为 TEOM1405D 分析仪, 该仪器是基于振荡天平法、以滤膜为基础的实时测量大气中颗粒物质量的监测设备。

2 降水、能见度与 $PM_{2.5}$ 基本特征

在分钟观测资料出现之前, 气象观测以一日内 02、08、14 和 20 时的 4 次观测为主, 不能定量详细地表征能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度随降水量大小变化的特征, 而逐分钟自动观测数据则能提供降水与能见度和 $PM_{2.5}$ 浓度瞬时相应变化的细致描述。根据从日尺度到分钟尺度逐步细化的降水频率统计, 杭州降水日数出现频率、降水小时数出现频率、分钟降水出现频率分别为 41.6%、12.9% 及 2.5%。时间尺度的细化在不同层面上(从日到分钟)刻画了降水的出现频次。有降水时分钟降水量为 0.1、0.2、0.3 与 0.4 mm 的出现频率分别为 81.3%、11.9%、2.8% 和 1.3%(图 1), 说明随着降水强度增大, 出现频率明显下降。根据分钟观测资料, 2014—2015 年, 杭州的平均能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度分别为 6.8 km 和 $43.0 \mu g \cdot m^{-3}$ 。依据《霾的观测与预报等级》气象行业标准定义(中国气象局, 2010), 能见度在 2 km 以下为重度霾, 10 km 为霾与非霾的分界点, 将 2 km 以下和 10 km 以上分别定义为低能见度和高能见度天气, 按照 2 km 一个能见度等级进行划分, 计算杭州各等级能见度出现频率, 可知 2~4 km 出现频率最高, 达到 23.9%, 16~18 km 出现频率最低, 为 2.7%, 自 2~4 km 至 16~18 km, 随着能见度等级的提高, 出现频率逐渐降低。杭州 2 km 以下低能见度出现频率为 14.4%, 10 km 以上高能见度出现频率为 21.9%, 说明观测期间大气能见度状况不容乐观。这在很大程度上与地理位置及社会经济结构有关,

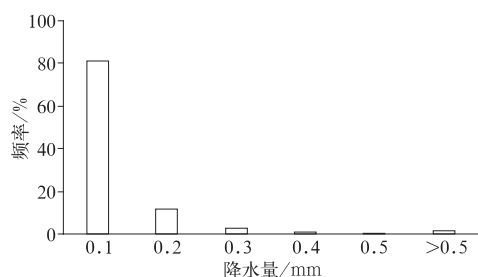


图 1 杭州分钟降水各级降水量出现频率
Fig. 1 Occurrence frequency of different levels of precipitation at minute-scale over Hangzhou

杭州地处内陆地区且城市化程度较高,大气自清洁能力较差。从杭州 PM_{2.5} 的分布也能得到体现,根据环境空气质量指数 (air quality index, AQI) 技术规定 (中华人民共和国环境保护部, 2016), 若仅统计 PM_{2.5} 浓度, 则 0~35 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (空气质量优) 出现频率为 45.0%, 35~75 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (空气质量良) 为 43.0%, 75~115 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (轻度污染) 为 10.0%, 115 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上 (中度污染以上) 为 2.0%, 轻度及其以上污染比例达到 12%, 说明 PM_{2.5} 对杭州大气环境有着至关重要的影响。

3 典型降水过程对能见度及 PM_{2.5} 浓度的影响

对降水等级的定义一般以 24 h 降水量来统计, 24 h 累积降水量超过 50 mm 为暴雨, 超过 100 mm 为大暴雨。实际降水过程又分为两种形态, 一是持续的降水过程, 此类过程能见度变化基本稳定, 随着雨量大小的变化, 能见度有小幅波动。以 2014 年 5 月 13 日 19:00 至 14 日 03:00 降水过程为例 (图 2), 期间浙江处在南支槽前, 北支多小槽活动, 导致 2014 年 5 月 8—21 日长时间的连阴雨过程, 5 月 13 日中低层西南暖湿气流明显加强北抬, 和北方弱冷空气结合, 引起浙江中北部一次大范围的降水过程, 属于典型的雨强相对较小, 但持续时间长的大尺度持续性降水过程, 5 月 13 日 19:00 至 14 日 03:00 降水总量达到 76.5 mm, 降水最集中的时段主要为 13 日 20:30—23:40, 之后一直有持续的降水, 21:00—00:00 (21:00 指的是 20:01—21:00, 以此类推) 逐小时降水量分别达 8.2、11.0、19.1 和 25.9 mm。图 2 表明, 降水对能见度的影响十分明显, 从 20:30 降水开始, 能见度迅速从 6.2 km 下降

至 0.6 km, 并一直维持在 1 km 以下; 直到 00:00 过后, 降水强度减小, 能见度才缓慢回升, 降水期间能见度明显低于降水之前。而降水对 PM_{2.5} 的清除作用并没有像能见度的变化那么迅速, 说明弱降水对颗粒物的清除作用有限, 从 20:30 降水产生后, 风速一直维持在 2.0~3.0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风速变化平稳, 气温下降也在日变化范围内, 受降水影响, PM_{2.5} 浓度逐渐从 85 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 缓慢下降到 20 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 期间分为几个阶段: 21:00—22:30 PM_{2.5} 浓度基本平稳, 这与降水起始阶段 PM_{2.5} 浓度高, 降水较弱有关; 22:30—23:30 缓慢下降, 期间降水强度加强, 对 PM_{2.5} 清除作用也加强; 23:30 至次日 01:00 快速下降, 因降水一直持续, 对 PM_{2.5} 清除作用更加明显; 01:00 时以后降水时有时无, PM_{2.5} 浓度变化基本平稳。

降水的另一种形态是突发性的强降水过程, 此类过程降水密集、雨量大、能见度迅速降低且随雨势骤强骤弱变化幅度大, 对 PM_{2.5} 粒子的清除作用也很明显, 使 PM_{2.5} 浓度明显下降。同样选取了一次典型过程, 以 2015 年 8 月 20 日下午强降水过程为例 (图 3), 当天杭州位于副热带高压北缘, 最高温度达到 35℃, 属于典型的副热带高压边缘午后强对流, 中小尺度短时强降水天气 (侯淑梅等, 2017), 当天降水时段集中在 15:04—16:35, 过程降水量 76.7 mm。15:00 之前, 能见度平稳维持在 4.5 km 左右, PM_{2.5} 浓度也维持在 80 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 从 15:04 降

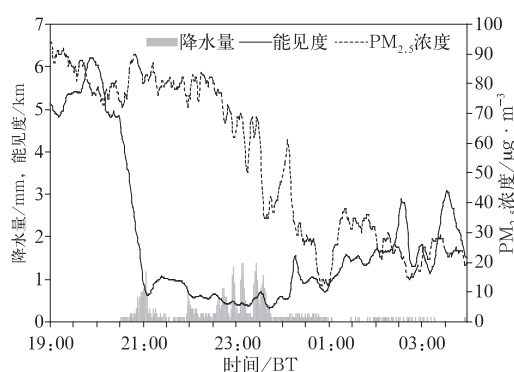


图 2 2014 年 5 月 13 日 19:01 至 14 日 03:59
杭州市 PM_{2.5} 浓度、降水量、能见度
逐分钟变化趋势

Fig. 2 Evolution of PM_{2.5} concentration, visibility and precipitation at minute-scale over Hangzhou from 19:01 BT 13 to 03:59 BT

14 May 2014

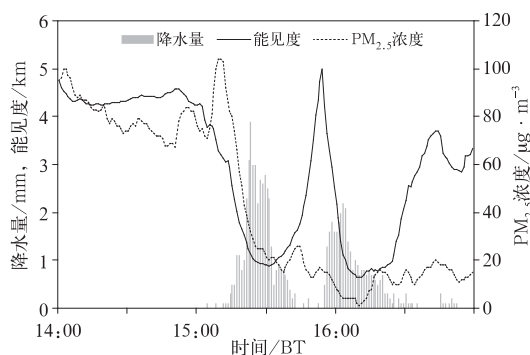


图 3 同图 2, 但为 2015 年 8 月
20 日 14:01—16:59

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the period
from 14:01 BT to 16:59 BT 20 August 2015

水开始且强度迅速增强,能见度在短时间内下降到 1 km 以下,PM_{2.5}浓度在 15:10 之前有些升高,之后随雨势增大浓度迅速降低;15:43—15:54 降水有 10 分钟的间歇,能见度也迅速回升到降水前的状态,PM_{2.5}浓度在 20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 附近摆动略有下降;之后雨势再度迅速增大,能见度再次迅速减小,最低能见度为 0.6 km,出现在 16:10,对应的分钟降水量为 0.7 mm,PM_{2.5}浓度也降至最低 2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

从两种降水形态的具体过程来看,降水对能见度的影响是极其明显的,但降水伴随着雨雾,因此最低能见度不一定出现在最大降水发生的时段。相比持续稳定的降水过程造成持续低能见度而言,突发强降水会造成能见度的大幅降低。降水对 PM_{2.5} 的清除作用在降水较小并持续时,会造成 PM_{2.5} 浓度的缓慢下降;而强降水过程对 PM_{2.5} 的清除作用十

分明。降水量、能见度、PM_{2.5} 浓度三者之间表现出基本一致的同步变化,降水与能见度两者之间同步变化更加一致,影响 PM_{2.5} 浓度因素较多,降水与 PM_{2.5} 浓度变化会出现降水强度加大,PM_{2.5} 浓度升高情况多出现在降水过程的初始阶段。总体来讲,降水能改善空气质量。

4 降水对能见度的影响分析

降水对能见度有着复杂的影响。尽管杭州在无降水或弱降水情景下雾、霾、扬沙和浮尘等均对能见度有影响,但无降水时平均能见度仍然可以达到 7.1 km;而一旦出现降水,平均能见度迅速下降,为 2.9 km,不到无降水时的一半。

把降水按无降水和 0.5 mm 一个间隔划分为 6 个等级,能见度按 <2 km、2~5 km、5~10 km 和 ≥ 10 km 划分为 4 个等级,统计分钟降水不同等级下不同等级能见度出现频率及平均能见度,来讨论降水对能见度影响的定量关系(表 1)。

分钟降水量在 0.1~0.5 mm 时,能见度平均值仅为 3.1 km,超过 0.5 mm 以上降水时能见度降到 2.0 km 以下。从各等级降水影响下各级能见度分布频率分析,随着降水增大,高能见度出现频率逐步减少,而低能见度出现频率逐步增加,尤其是从无降水到有降水,高能见度出现频率迅速下降,10 km 以上能见度在无降水时出现频率为 22.5%,而在降水为 0.1~0.5 mm 等级时出现频率下降至 2.2%;2 km 以下能见度频率,在无降水时为 13.5%,降水达 2.0 mm 以上时可升至 78.4%。

表 1 不同分钟降水等级下各能见度区间出现频率及平均能见度
Table 1 Different mean visibility and visibility occurrence frequency under
different grades of minute-scale precipitation

降水等级/mm	不同等级能见度频率/%				平均能见度/km
	<2 km	2~5 km	5~10 km	≥ 10 km	
无降水	13.5	33.1	30.9	22.5	7.1
0.1~0.5	40.9	42.3	14.6	2.2	3.1
0.6~1.0	67.0	26.9	4.8	1.3	1.8
1.1~1.5	69.9	25.5	3.7	1.1	1.8
1.6~2.0	73.7	18.4	7.9	0.0	1.8
2.1 以上	78.4	16.2	5.4	0.0	1.7

在以上分析基础上进一步细化,将分钟降水按 0.1 mm 一个等级递增,求各等级下平均能见度,然后绘制降水量与能见度散点图(图 4)。因降水量越

大,个例越少,统计值的代表性也相应降低,因此最大降水取为 2.0 mm。由图可见,降水与能见度符合幂函数分布特征,两者相关系数达到 0.97,通过

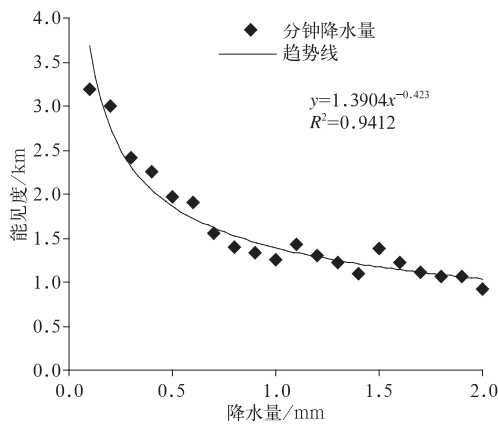


图 4 杭州分钟降水与能见度统计关系图
Fig. 4 Statistical characteristics of the relationship between precipitation and visibility at minute-scale in Hangzhou

了 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验。随着降水量增大,能见度逐步下降,在初始阶段降水量从 0.1 mm 开始逐步增大的过程中,能见度下降明显。在降水增大到一定阈值后,随降水强度继续增加,能见度下降开始减缓,在能见度随降水强度增大从快速下降到慢速下降的过程中有一个转折点,这一转折点即为拟合曲线的拐点,计算得出拐点对应的降水量值为 0.6 mm,各地因气候特征不同、降水形态存在差异,拐点值有所区别。

5 降水对 PM_{2.5} 浓度的影响分析

降水对大气气溶胶的清除是维持大气中悬浮粒子源汇平衡、大气自清洁的重要过程(彭红和秦瑜,1992;孙玫玲等,2008)。通过对降水情景下逐分钟观测资料分析,可知降水对 PM_{2.5} 浓度的影响不如对能见度的影响那么敏感。为恰当描述降水对 PM_{2.5} 浓度的影响,把分钟尺度的观测资料统计到小时尺度,根据小时尺度统计结果分析,有降水与无降水情景下 PM_{2.5} 小时平均浓度。在有降水时,PM_{2.5} 平均浓度为 $24.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,明显低于无降水时的 $55.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。把 PM_{2.5} 浓度划分为 $<15 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $15 \sim 25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $25 \sim 35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $35 \sim 45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $45 \sim 55 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $55 \sim 65 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $65 \sim 75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $75 \sim 115 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $\geq 115 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 共 9 个等级,统计各等级下 PM_{2.5} 浓度分别在有降水与无降水时出现次数的百分率(表 2)。结果表明,有降水时 PM_{2.5} 浓度在各等级下的出现频率表现为从

低浓度等级向高浓度等级一致的降低。根据环境空气质量指数(中华人民共和国环境保护部,2016),PM_{2.5} 浓度达到 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 为空气优良上限阈值, $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 为空气污染下限阈值,在有降水时空气优良时数可以达到 68%,污染时数仅为 6%;而在无降水时,空气优良时数仅有 39%,明显少于有降水时,而空气污染时数出现频率为 18%,明显高于有降水时的出现频率。

表 2 不同等级 PM_{2.5} 浓度在有降水与无降水时出现频率

Table 2 Occurrence frequency of different levels of PM_{2.5} concentration under two scenarios with/without precipitation

PM _{2.5} 浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	有降水/%	无降水/%
<15	28.64	7.14
15~25	22.77	14.89
25~35	16.85	16.52
35~45	11.17	14.80
45~55	7.29	12.26
55~65	4.32	9.03
65~75	2.97	6.96
75~115	4.37	13.31
≥ 115	1.63	5.10

进一步研究在有降水时降水对 PM_{2.5} 的清除能力。利用降水前一小时 PM_{2.5} 浓度与降水后一小时 PM_{2.5} 浓度差值,来表达降水对 PM_{2.5} 的清除量。影响 PM_{2.5} 浓度的气象条件,除降水外,风速、风向和对流条件等均有影响(Kim et al,2006;吴兑等,2007;张小曳,2007;蒲维维等,2011;Zhang et al,2012;宋连春等,2013;王海畅等,2015),因此计算得到的降水对 PM_{2.5} 的清除量有正清除也有负清除,说明了多种要素的综合影响(彭红和秦瑜,1992;刘西川等,2010;吴建军等,2010)。分别统计在不同降水等级下(表 3)及不同 PM_{2.5} 浓度等级下(表 4)降水对 PM_{2.5} 的正清除与负清除各占降水小时数的百分率,结果表明:随着降水量增大,降水对 PM_{2.5} 的清除作用逐渐增大。此外,降水前的 PM_{2.5} 浓度大小也对降水的清除作用有较大影响。由表 4 可知,PM_{2.5} 浓度在 $25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下时,降水基本体现不出清除作用;而超过 $25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以后,降水的清除作用逐渐凸显,尤其是 PM_{2.5} 浓度达到 $65 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上时,正清除频次已达负清除的 2 倍以上。

由以上分析可知,降水对 PM_{2.5} 的清除量大小,除与降水量密切相关外,也与降水前 PM_{2.5} 浓度密

表 3 各等级降水量下 PM_{2.5} 清除量 >0 与 <0 所占降水次数百分率Table 3 Positive and negative PM_{2.5} removing ratios under different levels of precipitation

降水等级/mm	<1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~10	>10
A/%	33.60	9.77	3.99	1.94	1.55	2.49	1.00
B/%	31.78	7.16	2.88	1.14	0.86	1.44	0.41
A/B	1.06	1.36	1.39	1.69	1.80	1.73	2.43

注: A:清除量>0 占总降水次数的比例;B:清除量<0 占总降水次数的比例。

Note: A (B) is the ratio of removing ratio being greater than 0 (less than) to precipitation numbers.

表 4 不同等级 PM_{2.5} 浓度在降水时的清除量 >0 与 <0 所占降水次数百分率Table 4 Positive and negative PM_{2.5} removing ratios under different levels of PM_{2.5} concentration

PM _{2.5} 等级/ μg·m ⁻³	<15	15~25	25~35	35~45	45~55	55~65	65~75	75~115	>115
A/%	11.09	11.24	9.65	7.48	5.22	2.88	1.85	3.40	1.26
B/%	16.23	11.83	7.45	4.31	2.20	1.56	0.88	1.26	0.21
A/B	0.68	0.95	1.30	1.73	2.37	1.85	2.10	2.70	6.14

注: A 与 B 含义同表 3。

Note: A and B same as Table 3.

切相关。以这两个要素为因子,建立杭州 PM_{2.5} 清除量的非线性拟合方程,构建统计模型如下:

$$Y = 0.85 + 0.49C + 0.02CP - 0.7\ln C - 0.32\ln P + 0.13\ln C\ln P$$

式中, Y 为降水对 PM_{2.5} 清除量, C 为 PM_{2.5} 初始浓度, P 为小时降水量。模拟清除量结果与观测清除量的相关系数达到 0.65, 通过了 0.01 的显著性水平检验, 取得较好的模拟效果。

6 结论与讨论

能见度与 PM_{2.5} 浓度受多种气象要素及天气系统的影响。降水是大气自清洁的重要过程, 降水量大小及持续时间对能见度与 PM_{2.5} 浓度有明显作用。本文以杭州为例, 利用 2014—2015 年逐分钟气象观测资料, 对比分析了不同降水条件下能见度及 PM_{2.5} 浓度的分布特征及不同强度降水对能见度及 PM_{2.5} 浓度影响的定量关系, 主要结论为:

(1) 杭州分钟降水量达到 0.1、0.2、0.3 与 0.4 mm 4 个等级的频率分别为 81.3%、11.9%、2.8% 和 1.3%, 说明随着降水强度增大, 出现频率明显下降。2 km 以下低能见度出现频率为 14.4%, 10 km 以上高能见度出现频率为 21.9%, PM_{2.5} 浓度 0~35 μg·m⁻³ 出现频率为 45.0%, 75 μg·m⁻³ 以上为 12.0%, 说明空气质量总体状况不容乐观。

(2) 降水对能见度的影响是极其明显的, 相比持续稳定的降水过程造成持续低能见度而言, 突发强降水会造成能见度的大幅降低。杭州降水条件下

的能见度平均为 2.9 km, 明显低于非降水时的 7.1 km; 随着降水增大, 高能见度出现频率逐渐减少, 而低能见度出现频率逐渐增加, 10 km 以上能见度在无降水时出现频率为 22.5%, 而在 0.1~0.5 mm 降水背景下出现频率下降到 2.2%。降水与能见度之间关系符合幂函数分布特征, 能见度随降水量增加从快速下降过渡到慢速下降, 中间存在一个拐点, 降水小于拐点值时, 能见度随降水增大快速下降; 而降水大于拐点值时, 能见度随降水增大缓慢下降。

(3) 降水对 PM_{2.5} 的清除作用受降水量及降水前 PM_{2.5} 浓度大小共同作用。降水对 PM_{2.5} 的清除作用在降水较小并持续时, 会造成 PM_{2.5} 浓度的缓慢下降; 而强降水过程对 PM_{2.5} 的清除作用十分明显, 降水量、PM_{2.5} 浓度、能见度三者之间表现出基本一致的同步变化。在 PM_{2.5} 浓度超过 25 μg·m⁻³ 以后, 降水的清除作用随 PM_{2.5} 浓度增加逐渐增强。利用小时降水量与降水前 PM_{2.5} 浓度两个因子, 采用非线性拟合方案构建了杭州降水对 PM_{2.5} 清除量统计模型, 模拟结果与原始记录的相关系数达到 0.65, 取得较好的模拟效果。

本文在分析杭州降水对能见度和 PM_{2.5} 浓度的影响时, 忽略了降水过程中伴随的雨雾、对流天气及风等起到的作用, 而降水的另一种形态降雪也没有涉及, 且 PM_{2.5} 对能见度也有明显影响, 如综合考虑, 其影响特征将更加复杂与多样。

参考文献

白永清, 祁海霞, 刘琳, 等, 2016. 武汉大气能见度与 PM_{2.5} 浓度及相

- 对湿度关系的非线性分析及能见度预报[J]. 气象学报, 74(2): 189-199.
- 蔡子颖, 刘爱霞, 韩素芹, 等, 2014. 天津低能见度特征初探[J]. 气象, 40(1): 114-118.
- 曹伟华, 梁旭东, 李青春, 2013. 北京一次持续性雾霾过程的阶段性特征及影响因子分析[J]. 气象学报, 71(5): 940-951.
- 董群, 赵普生, 陈一娜, 2016. 降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力[J]. 环境科学, 37(10): 3686-3692.
- 侯淑梅, 郭俊建, 张磊, 等, 2017. 西风槽与副高相互作用的暴雨过程动力场结构特征分析[J]. 气象, 43(2): 151-165.
- 刘西川, 高太长, 刘磊, 等, 2010. 降水现象对大气消光系数和能见度的影响[J]. 应用气象学报, 21(4): 433-441.
- 马雁军, 刘宇微, 洪也, 等, 2012. 2011 年春季辽宁一次沙尘天气过程及其对不同粒径颗粒物和空气质量的影响[J]. 环境科学学报, 32(5): 1160-1167.
- 马雁军, 左洪超, 张云海, 等, 2005. 辽宁中部城市群大气能见度变化趋势及影响因子分析[J]. 高原气象, 24(4): 623-628.
- 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.
- 蒲维维, 赵秀娟, 张小玲, 2011. 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, 22(6): 716-723.
- 舒小健, 高太长, 刘西川, 等, 2017. 基于降水微物理特征测量仪的雨滴形状观测与分析[J]. 气象, 43(1): 91-100.
- 宋连春, 高荣, 李莹, 等, 2013. 1961—2012 年中国冬半年霾日数的变化特征及气候成因分析[J]. 气候变化研究进展, 9(5): 313-318.
- 孙玫玲, 穆怀斌, 吴丹朱, 等, 2008. 天津城区秋季 PM_{2.5} 质量浓度垂直分布特征研究[J]. 气象, 34(10): 60-66.
- 王海畅, 吴泽邦, 周景博, 等, 2015. 北京上甸子站 PM_{2.5} 浓度与气象要素关系分析[J]. 气象与环境学报, 31(5): 99-104.
- 王继康, 花丛, 桂海林, 等, 2017. 2016 年 1 月我国中东部一次大气污染物传输过程分析[J]. 气象, 43(7): 804-812.
- 王天舒, 牛生杰, 2017. 内蒙古东部春季三类沙尘天气气溶胶散射系数及其与 PM₁₀、能见度相关性分析[J]. 大气科学, 41(1): 121-131.
- 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.
- 吴建军, 袁松松, 周曾奎, 等, 2010. 短时强降雨对能见度的影响[J]. 气象科学, 30(2): 274-278.
- 于庚康, 王博妮, 陈鹏, 等, 2015. 2013 年初江苏连续性雾-霾天气的特征分析[J]. 气象, 41(5): 622-629.
- 张小曳, 2007. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究[J]. 地球科学进展, 22(1): 12-16.
- 中国气象局, 2010. QX/T 113—2010: 霾的观测和预报等级[S]. 北京: 气象出版社.
- 中华人民共和国环境保护部, 2016. HJ 633—2012: 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)[S]. 北京: 中国环境科学出版社.
- Chang Di, Song Yu, Liu Bing, 2009. Visibility trends in six megacities in China 1973—2007[J]. Atmos Res, 94(2): 161-167.
- Fu Gang, Guo Jingtian, Angeline P, et al, 2008. An analysis and modeling study of a sea fog event over the Yellow and Bohai Seas[J]. J Ocean Univ China, 7(1): 27-34.
- Fu Gang, Guo Jingtian, Xie Shangping, et al, 2006. Analysis and high-resolution modeling of a dense sea fog event over the Yellow Sea[J]. Atmos Res, 81(4): 293-303.
- Kim Y J, Kim K W, Kim S D, et al, 2006. Fine particulate matter characteristics and its impact on visibility impairment at two urban sites in Korea: Seoul and Incheon[J]. Atmos Environ, 40(S2): 593-605.
- Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al, 2012. Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols[J]. Atmos Chem Phys, 12(2): 779-799.
- Zhang Yanlin, Cao Fang, 2015. Fine particulate matter (PM_{2.5}) in China at a city level[J]. Sci Rep, 5: 14884. DOI: 10.1038/srep14884.