郑飒飒,王维佳,刘东升,等.2024.四川盆地降水对$PM_{2.5}$和PM_{10}的清除作用分析[J].暴雨灾害,43(5):607-616. ZHENG Sasa, WANG Weijia, LIU Dongsheng, et al. 2024. Scavenging effect analysis of precipitation on $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Sichuan Basin [J]. Torrential Rain and Disasters,43(5):607-616 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-146

四川盆地降水对$PM_{2.5}$和PM_{10}的清除作用分析

郑飒飒[1,2,3],王维佳[1,2,3],刘东升[1,2],苗红妍[4]

(1. 四川省人工影响天气办公室,成都 610072;2. 四川省气象局, 成都 610072; 3. 中国气象局云降水物理与人工影响天气重点开放实验室,北京 100081;4. 中国气象局气象干部培训学院辽宁分院,沈阳 110166)

摘　要:四川盆地是中国空气污染最严重的区域之一,为研究降水对四川盆地$PM_{2.5}$、PM_{10}的清除作用,利用2016—2021年四川盆地90个环境监测站$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度观测资料和17个地面气象站观测资料,首先分析了降水对四川盆地$PM_{2.5}$、PM_{10}空间分布的影响;然后基于描述降水前后气溶胶粒子质量浓度变化的清除率,揭示了降水强度、时长对$PM_{2.5}$、PM_{10}清除效果的影响;最后,利用雨滴谱分布、雨滴大小、下降末速度等雨滴谱参量计算污染物的清除系数,分析了四川盆地4次污染事件中降水对$PM_{2.5}$、PM_{10}的清除效果。结果表明:(1) 四川盆地降水影响$PM_{2.5}$、PM_{10}空间分布,降水量越大、降水持续时间越长,清除率越大,清除效果越明显;(2) 大雨个例中,降水持续时间大于6 h后,清除率对降水持续时间增加不敏感;(3) 当雨滴直径、雨滴总个数和分钟雨强出现峰值,雨滴谱加宽变强后,$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度快速降低;(4) 清除系数对$PM_{2.5}$和PM_{10}质量浓度变化具有指示意义,当清除系数峰值达10 h^{-1}以上,降水对$PM_{2.5}$和PM_{10}清除效果显著。

关键词:$PM_{2.5}$;PM_{10};降水;雨滴谱;清除作用

中图法分类号:P426.62　　**文献标志码:**A　　**DOI:**10.12406/byzh.2023-146

Scavenging effect analysis of precipitation on $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Sichuan Basin

ZHENG Sasa[1,2,3], WANG Weijia[1,2,3], LIU Dongsheng[1,2], MIAO Hongyan[4]

(1. *Weather Modification Office of Sichuan Province, Chengdu* 610072; 2. *Sichuan Provincial Meteorological Service, Chengdu* 610072; 3. *Cloud-Precipitation Physics and Weather Modification Key Laboratory, CMA Beijing* 100081; 4. *Meteorological Administration Training Center Liaoning Branch, Shenyang* 110166)

Abstract: The Sichuan Basin is one of the most severely air-polluted regions in China. To study the scavenging effect of precipitation on $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Sichuan Basin, the $PM_{2.5}$ and PM_{10} mass concentration data from 90 environmental monitoring stations and observation data from 17 ground meteorological stations in Sichuan Basin from 2016 to 2021 were used. First, the effects of precipitation on the spatial distribution of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in the Sichuan Basin were analyzed. Then, the influence of precipitation intensity and duration on $PM_{2.5}$ and PM_{10} removal effects was revealed based on the removal rates of aerosol particle mass concentration changes before and after precipitation. Finally, by calculating the removal coefficients using the raindrop spectral distribution, raindrop sizes, and end-of-fall velocities, the removal effects of precipitation on four $PM_{2.5}$ and PM_{10} pollution events in the Sichuan Basin were investigated. The results are as follows: (1) In the Sichuan Basin, precipitation affects the spatial distribution of $PM_{2.5}$ and PM_{10}. The greater the precipitation amounts and the longer the duration of precipitation, the greater the removal rates and the more significant the scavenging effect. (2) In cases of heavy rainfall, removal rates are not sensitive to increases in precipitation duration when it exceeds 6 hours. (3) When the raindrop diameter, the total number of raindrops, and the minute rain intensity peak, and the raindrop spectra broaden and intensify, rapid decreases of $PM_{2.5}$ and PM_{10} mass concentrations occur. (4) The removal coefficients are indicative of variations in $PM_{2.5}$ and PM_{10} mass concentrations. When the peak removal coefficients are above 10 h^{-1}, the scavenging effect of precipitation on $PM_{2.5}$ and PM_{10} is significant.

Keywords: $PM_{2.5}$; PM_{10}; precipitation; raindrop spectra; scavenging effect

收稿日期: 2023-07-12;**定稿日期:**2023-11-29

资助项目: 四川省科技计划项目(2019YJ0621,2023YFS0442);高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目(SCQXKJQN2020049)

第一作者: 郑飒飒,主要从事大气物理学与大气环境监测技术研究。E-mail:zssxhsd@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

引 言

空气中的气溶胶细颗粒物($PM_{2.5}$)和可吸入颗粒物(PM_{10})过多造成的空气污染不仅影响人们身体健康,而且对交通运输、工业生产等造成不利影响,降水则可以明显清除颗粒物。Pranesha 和 Kamra(1997)研究得出短时间内的强降水更有利于清除直径大于2.2 μm的气溶胶粒子。Tai 等(2010)通过多元线性模型分析得出可吸入颗粒物的质量浓度与降水量呈负相关。Bae 等(2012)研究发现降水对气溶胶的清除效果取决于雨滴直径、雨强和颗粒物直径。

降水对云下气溶胶的清除作用多采用清除率和清除系数来描述,其中清除率是通过对比降水前后气溶胶粒子的质量浓度变化得出,描述降水对气溶胶粒子清除强度,适用于多样本降水过程分析,研究结论代表区域特征,如唐仁茂等(2017)研究了武汉地区典型降水过程对多类污染物的清除效果,清除率最高的是颗粒污染物。曹杨等(2020) 研究了不同降水量对成都市不同污染物的清除效果,指出$PM_{2.5}$、PM_{10}、NO_2、CO和SO_2的清除率随降水量的增加逐渐增大,O_3清除率随降水量增加变化不大。清除系数则是通过雨滴尺度、下降末速度、碰并系数等计算得出,描述降水对气溶胶粒子清除作用的时间变化序列,适用于典型污染事件分析,能更精细描述污染事件清除作用的变化过程。姚克亚等(1999)指出雨滴谱改变对总质量清除系数影响很大,计算某一地区降雨对气溶胶粒子总质量清除时,应当了解其雨滴谱特征。Andronache(2003)研究发现,降水清除系数与降水强度正相关,在雨强0.01 ~ 100 mm·h^{-1}范围,清除系数存在2个数量级差别。王瑛等(2014)研究指出当气溶胶粒径小于0.1 μm时,非雷暴天气下清除系数实测值与理论值趋势一致;当粒径为0.1 ~ 1 μm,雷暴天气的清除系数的实测值高于非雷暴天气,且清除系数与雨强呈正指数关系。

四川盆地四面环山,易出现持续的静稳天气形势,盆地内成渝城市群有近亿人口,工业化进程较快,促进$PM_{2.5}$与PM_{10}的生成和累积,导致区域内$PM_{2.5}$和PM_{10}污染事件时有发生,是中国空气污染最严重区域之一(李培荣和肖天贵,2020;王聪聪等,2023;文雯和刘自牧,2023)。目前,一些学者开展了降水对四川盆地$PM_{2.5}$、PM_{10}清除作用的研究,吴亚平等(2020)研究指出雅安作为四川盆地的“雨城”,降雨量和气压与$PM_{2.5}$和PM_{10}污染关联最大,降水对颗粒物的湿清除效应显著。林丹等(2023)研究表明,随着降水强度或$PM_{2.5}$初始质量浓度增加,四川盆地$PM_{2.5}$正清除过程占比增加,清除率升高。这些研究主要侧重在单一城市或站点,缺少区域特征方面的研究。另外,雨滴谱仪可以观测更精细的降雨特征,而四川盆地降水的雨滴谱分布特征对$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度影响的研究尚未开展。本文在分析四川盆地$PM_{2.5}$、PM_{10}和降水量空间分布特征基础上,分析了降水强度、降水时间对$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度清除率的影响,然后基于雨滴谱观测数据计算污染物的清除系数,分析4次污染事件中降水对$PM_{2.5}$、PM_{10}的清除效果,以期为有效开展人工增雨作业改善空气质量,为四川盆地$PM_{2.5}$和PM_{10}空气质量治理提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料介绍

根据环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)(环境保护部,2012),当$PM_{2.5}$质量浓度 > 35 μg·m^{-3},AQI指数 > 50,空气质量为轻度污染,极少数异常敏感人群应减少户外活动,本文选取降水前$PM_{2.5}$质量浓度 > 35 μg·m^{-3}的降水个例进行研究。

气象资料为2016—2021年四川盆地17个国家气象站逐小时降水量、整点10 min平均风速等地面观测资料。环境资料为2016—2021年四川盆地17个地级及以上城市90个环境空气质量监测站逐小时$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度监测数据,将每个城市的多个环境监测站质量浓度监测数据逐小时求平均,得到17个城市的$PM_{2.5}$和PM_{10}逐小时质量浓度,用于分析降水对四川盆地$PM_{2.5}$、PM_{10}空间分布影响及降水特征对$PM_{2.5}$、PM_{10}清除率的影响。将$PM_{2.5}$和PM_{10}质量浓度与小时降水量一一对应,共筛选出5 163组样本。

四川盆地西南部乐山市的降水天气现象仪观测数据包括分钟降水现象数据和分钟雨滴谱数据,雨滴谱数据按照雨滴尺度和下落末速度不同,将观测到落在采样区域内的雨滴个数划分到32档的矩阵中,雨滴谱数据用于计算雨滴直径、雨滴数浓度、雨强等降水特征量,计算清除系数。雨滴谱数据优势为时间精度高,采样时间间隔T为60 s,粒径范围0.062 ~ 24.5 mm,粒速范围0.05 ~ 20.8 m·s^{-1},粒径和粒速分辨率均为32等级,采样面积S为54 cm^2。

1.2 研究方法

1.2.1 降水过程强度划分及降水量分区

当站点的降水停歇间隔超过1 h,定义为2次降水过程,参照栾天等(2019)等研究,在一次降水过程中,按照最大小时累积降水量,将降水过程划分为3个等级,小雨降水过程为最大小时降水量≤2.5 mm,中雨降水过程为最大小时降水量在(2.5,7.5] mm范围,大雨降水过程为最大小时降水量 > 7.5 mm。

在分析降水强度对$PM_{2.5}$、PM_{10}清除率的影响中，将小雨降水过程按0.4 mm间隔划分为5个区间，中雨降水过程和大雨降水过程分别为1个区间研究；在分析降水时长对$PM_{2.5}$、PM_{10}清除率的影响中，将降水持续时间按(0—1] h，[2—3] h，[4—5] h，[6—7] h，[8—12] h，[13—17] h，划分为6个区间。

1.2.2 清除率

清除率(ΔC)用于描述降水对$PM_{2.5}$、PM_{10}清除作用(范凡等，2019；于人杰等，2020；武高峰等，2021)，计算公式为

$$\Delta C=\frac{C_b-C_p}{C_b}\times 100\% \tag{1}$$

式(1)中C_b为降水前3 h内$PM_{2.5}$、PM_{10}平均质量浓度，C_p为降水期间$PM_{2.5}$、PM_{10}平均质量浓度。

1.2.3 清除系数

利用降水天气现象仪观测的雨滴谱分布和雨滴大小、下降末速度等计算清除系数，进而分析降水对$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度的影响。雨滴谱中第i尺度和第j速度档的雨滴粒子数记为n_{ij}，第i档的雨滴数浓度(邱玉珺等，2020；张秋晨和王文青，2023)可以用$N(D_i)$表示，单位为个·$m^{-3}mm^{-1}$，S是采样面积，单位为cm^2，T是采样时间间隔，单位为s，计算公式为

$$N(D_i)=\sum_{j=1}^{32}\frac{n_{ij}}{S\cdot T\cdot V_j\cdot \Delta D_i} \tag{2}$$

式(2)中D_i是第i档的平均直径，V_j是第j档平均下落速度。式(3)中n_i表示速度在第j档所有粒子数，雨滴总数浓度N，单位为个·m^{-3}。

$$N=\sum\frac{n_i}{S\cdot T\cdot V_j} \tag{3}$$

$$I=\frac{\pi}{6}\cdot\frac{\sum n_iD_i^3}{S\cdot T} \tag{4}$$

$$D_m=\frac{\sum n_iD_i}{\sum n_i} \tag{5}$$

式(4)中雨强为I，单位为mm。式(5)中平均直径为D_m，单位为mm。

定义降水清除气溶胶粒子的清除系数(单位：h^{-1})(杨军等，2001)为

$$\Lambda=\int_0^\infty\frac{\pi}{4}D^2U_DE(D,d)N(D)dD \tag{6}$$

式(6)中D为雨滴直径，单位为mm；U_D为雨滴降落末速度，根据公式(2)可以计算得出，单位为m·s^{-1}；$E(D,d)$为碰并系数，$N(D)$为雨滴谱，单位为m^{-3}·mm^{-1}。若不考虑环境因素影响，采用相对固定的碰并系数，Scott(1982)在研究气溶胶粒子的清除系数时，采用平均碰并系数E=0.65，根据(6)式利用雨滴谱数据可以得到清除系数的时间序列。

2 结果与分析

2.1 降水量和$PM_{2.5}$、PM_{10}空间分布特征

对2016—2021年四川盆地年平均降水量和$PM_{2.5}$、PM_{10}年平均质量浓度进行克里金空间插值，分析6 a四川盆地降水和$PM_{2.5}$、PM_{10}空间分布特征，对比年平均和非降水时段年平均$PM_{2.5}$、PM_{10}污染的空间分布特征，分析降水对$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度的影响。

2.1.1 降水量和$PM_{2.5}$、PM_{10}污染分布特征

图1为2016—2021年四川盆地年平均降水量空间分布图，可见盆地西南部出现以雅安为中心的降水量高值区，盆地西北部、中部和南部出现降水量低值区，盆地东北部出现以达州、巴中等为中心降水量次高值区。因此，四川盆地降水量整体分布为自西向东依次是高-低-高。

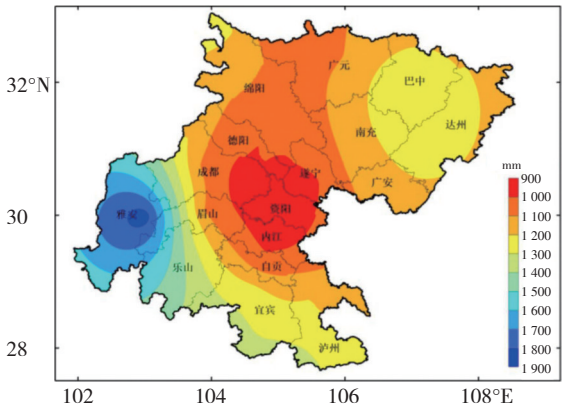


图1 2016—2021年四川盆地年平均降水量空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of average annual precipitation from 2016 to 2021 in the Sichuan Basin

图2a是2016—2021年四川盆地的$PM_{2.5}$年平均质量浓度空间分布图。可见污染最为严重的地区为盆地的南部宜宾-泸州-自贡一带，$PM_{2.5}$年平均质量浓度45 μg·m^{-3}以上，对应的年平均降水量为低值中心，污染最轻为以广元为中心在盆地东北部，$PM_{2.5}$年平均质量浓度低于40 μg·m^{-3}，对应的年平均降水量为次高中心(图1)，由此可见，$PM_{2.5}$年平均分布与年降水量分布联系紧密。四川盆地$PM_{2.5}$年平均质量浓度的空间分布特征自南向北依次高-中-低。图2b是2016—2021年四川盆地的PM_{10}年平均质量浓度空间分布图。可见PM_{10}年平均质量浓度整体分布自西向东依次是低-高-低，与四川盆地降水量分布趋势高-低-高刚好相反。污染较为严重区域为盆地西北部成都-绵阳一带，PM_{10}年平均质量浓度在69 μg·m^{-3}以上，污染最轻的是盆地东北部和盆地西南部，PM_{10}年平均质量浓度低于66 μg·m^{-3}。盆地南部宜宾-泸州-自贡一带$PM_{2.5}$年平均质量浓度高，PM_{10}年平均质量浓

度高值中心在盆地西北部成都–绵阳一带，与本地排放、外源输入以及气象条件等因素有关。廖乾邑等(2016)研究表明，四川盆地的成都、绵阳等城市 PM_{10} 受浮尘影响最大，主要原因可能是北方的浮尘气溶胶团到成都平原及周边后，受平原东南部龙泉山脉阻挡，移动缓慢，在龙泉山脉以西(成都等地) 滞留时间更长，沉降时间更长，导致此地区 PM_{10} 年平均质量浓度高。

2.1.2 非降水时段年平均 $PM_{2.5}$、PM_{10} 的变化

为了解降水对 $PM_{2.5}$、PM_{10} 的清除效果，剔除气象站观测到小时降水对应的 $PM_{2.5}$、PM_{10} 小时质量浓度资料，计算 2016—2021 年四川盆地 17 个地级以上城市年平均 $PM_{2.5}$、PM_{10} 质量浓度。图 2c 是 2016—2021 年四川盆地非降水时段 $PM_{2.5}$ 年平均质量浓度，与 $PM_{2.5}$ 年平均质量浓度(图 2a)比较，非降水时段 $PM_{2.5}$ 同样具有自南向北依次是高–中–低的空间分布特征，非降水时段 $PM_{2.5}$ 年平均质量浓度高于年平均质量浓度，质量浓度差值范围 0.7~2.6 $\mu g \cdot m^{-3}$，说明降水对 $PM_{2.5}$ 质量浓度有清除效果。图 2d 为 2016—2021 年四川盆地非降水时段 PM_{10} 年平均质量浓度的空间分布图，与图 2b 对比，非降水时段 PM_{10} 整体分布同样具有自西向东依次是低–高–低的空间分布特征，非降水时段 PM_{10} 年平均质量浓度高于年平均质量浓度，质量浓度差值范围 1.9 ~ 4.1 $\mu g \cdot m^{-3}$，非降水时段年平均质量浓度与年平均质量浓度的差值 PM_{10} 大于 $PM_{2.5}$，说明降水对 PM_{10} 的清除效果更明显。

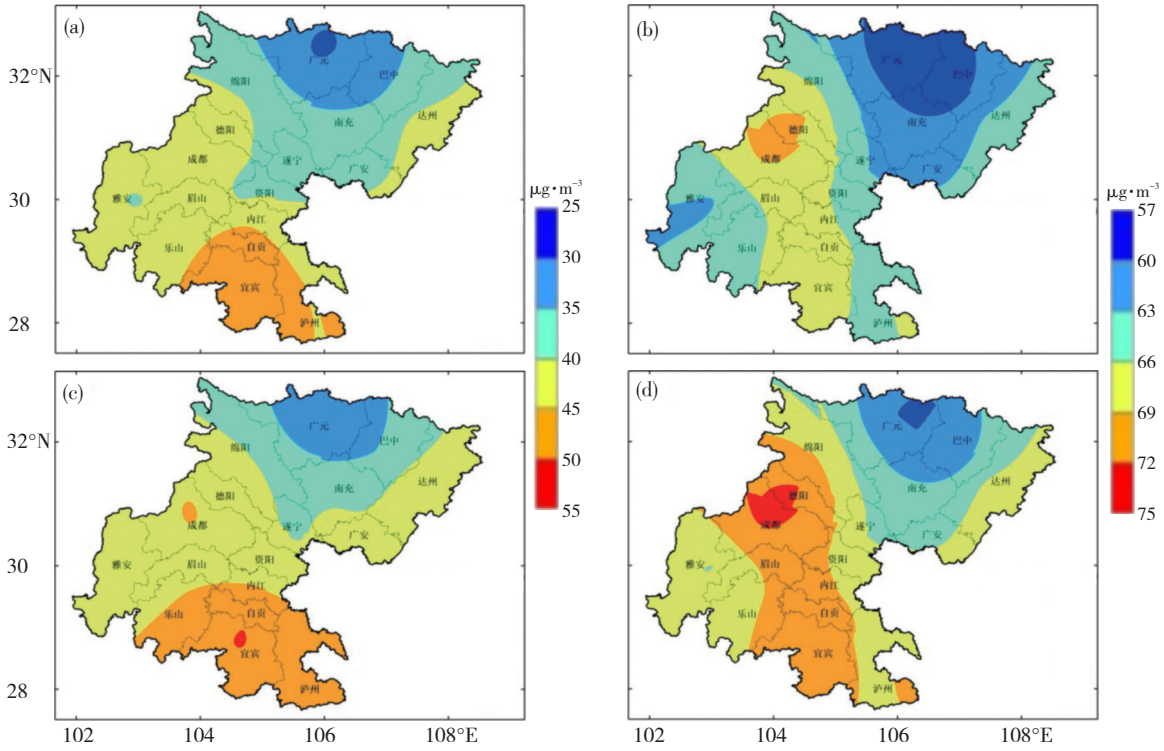


图 2 2016—2021 年四川盆地 $PM_{2.5}$ (a)、PM_{10} (b)和非降水时段 $PM_{2.5}$(c)、非降水时段 PM_{10}(d)年平均质量浓度空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of average annual concentrations of (a) $PM_{2.5}$, (b) PM_{10}, (c) $PM_{2.5}$ and (d) PM_{10} during non–precipitation periods from 2016 to 2021 in Sichuan Basin

2.2 降水特征对 $PM_{2.5}$、PM_{10} 清除率的影响

2.2.1 降水强度对清除率的影响

为研究降水强度对清除率的影响，将小时 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度与降水量一一对应，由图 3 可见，四川盆地小时降水量在 0.1 ~ 59.0 mm 范围内，大多数小时降水量在 0.0 ~ 10.0 mm 之间，约占样本总数的 98%，少数小时降水量大于 40.0 mm。随着小时降水量的增大，$PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度呈减小趋势。小时降水量低于 1.0 mm，对应较高的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度。

从图 4 可以看出，小雨降水过程中，随着降水强度增大，$PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 清除率逐渐上升，但不超过 30%；中雨降水过程中，$PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 清除率在 30% 左右；大雨降水过程 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 清除率可达到 40% 左右，$PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 清除率最大值分别可达 92.6% 和 92.5%。总体上来说，降水强度越大，清除率越大，不同降水强度对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的影响基本一致，清除效果相同。

2.2.2 降水时长对清除率的影响

从图 5 可以看出，降水持续时间增大，PM_{10} 的清除率略大于 $PM_{2.5}$，说明 PM_{10} 的清除率对持续时间更敏感。在小雨和中雨降水个例中，随着降水持续时间的增加，$PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 清除率增大，降水持续时间大于 13 h，

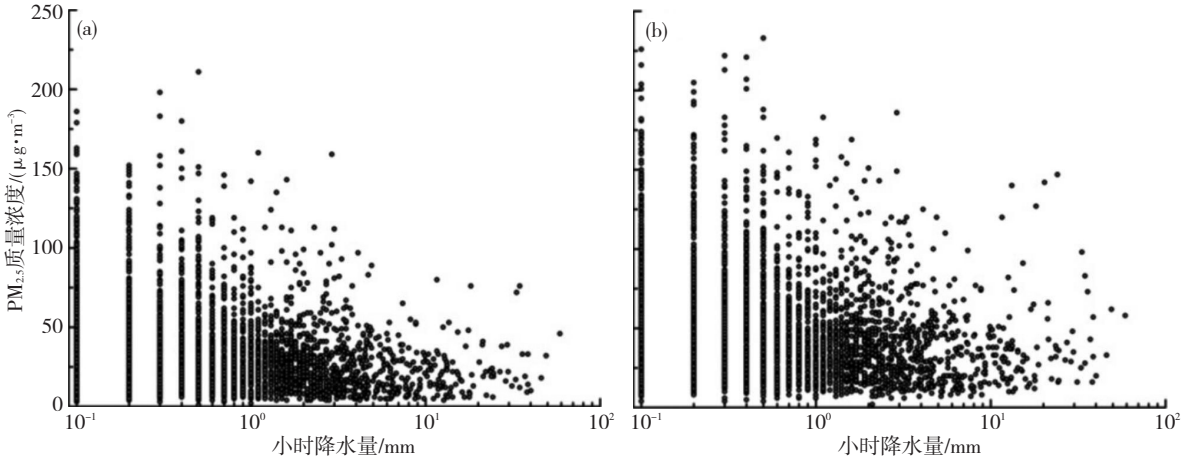


图3 2016—2021年四川盆地小时降水量与$PM_{2.5}$ (a)、PM_{10} (b)质量浓度散点图

Fig. 3 The scatter diagrams of hourly precipitation amounts and the mass concentrations of (a) $PM_{2.5}$ and (b) PM_{10} from 2016 to 2021 in the Sichuan Basin

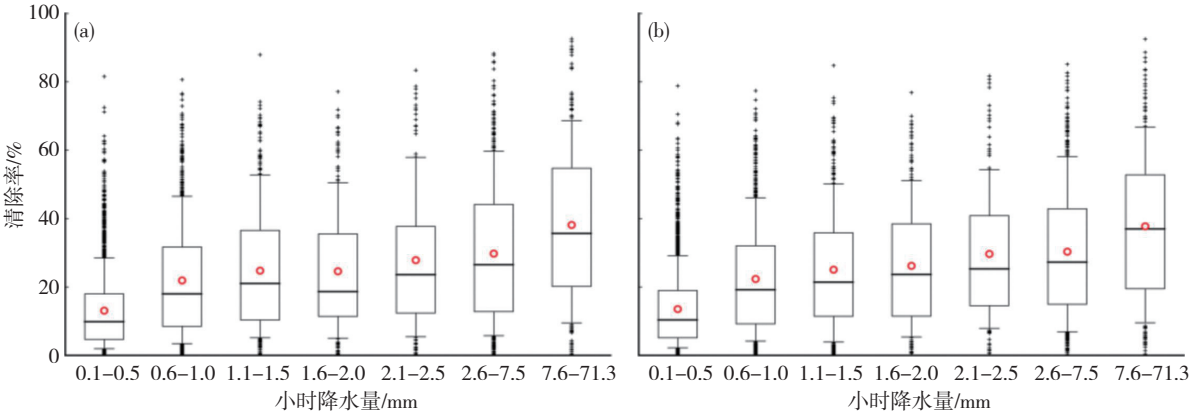


图4 2016—2021年四川盆地降水量与$PM_{2.5}$ (a)和PM_{10} (b)清除率的箱线图

Fig. 4 The box diagrams of the precipitation and the (a) $PM_{2.5}$ and (b) PM_{10} removal rates from 2016 to 2021 in the Sichuan Basin

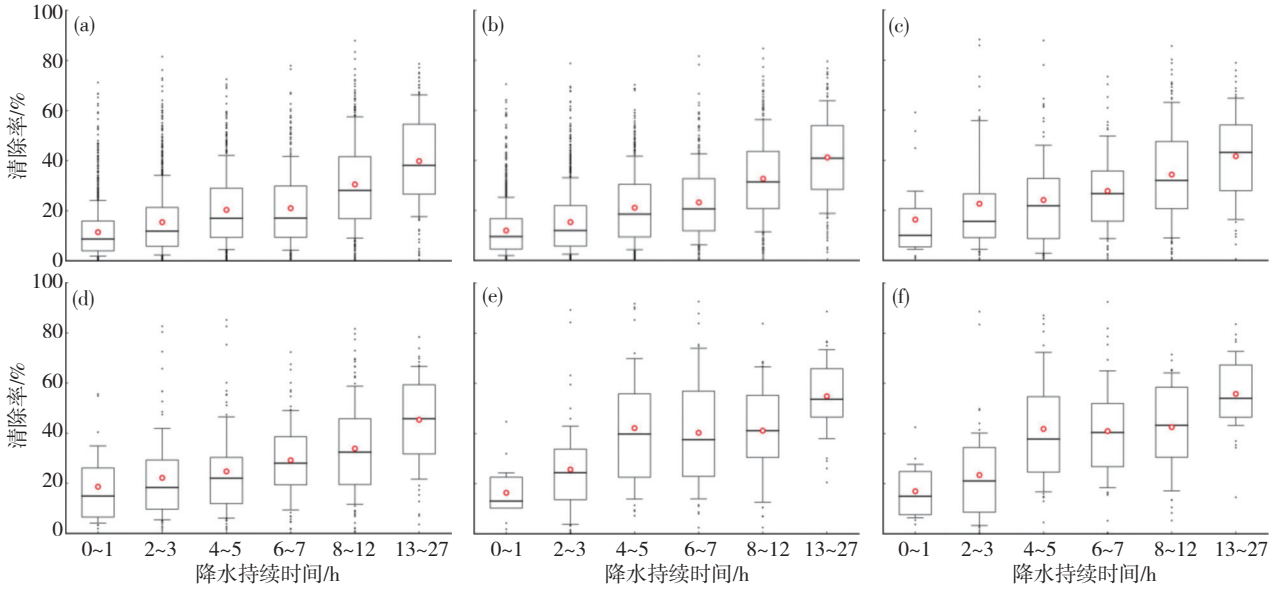


图5 2016—2021年四川盆地小雨(a、b)、中雨(c、d)、大雨(e、f)降水过程期间$PM_{2.5}$ (a、c、e)、PM_{10} (b、d、f)清除率的时间变化箱线图

Fig. 5 The time variation box diagrams of removal rates of (a, c, e) $PM_{2.5}$, (b, d, f) PM_{10} in (a, b) light, (c, d) moderate, and (e, f) heavy rain processes from 2016 to 2021 in the Sichuan Basin

$PM_{2.5}$和PM_{10}清除率大于40%；大雨降水个例中，当降　　水持续时间小于6 h，$PM_{2.5}$和PM_{10}清除率随降水持续

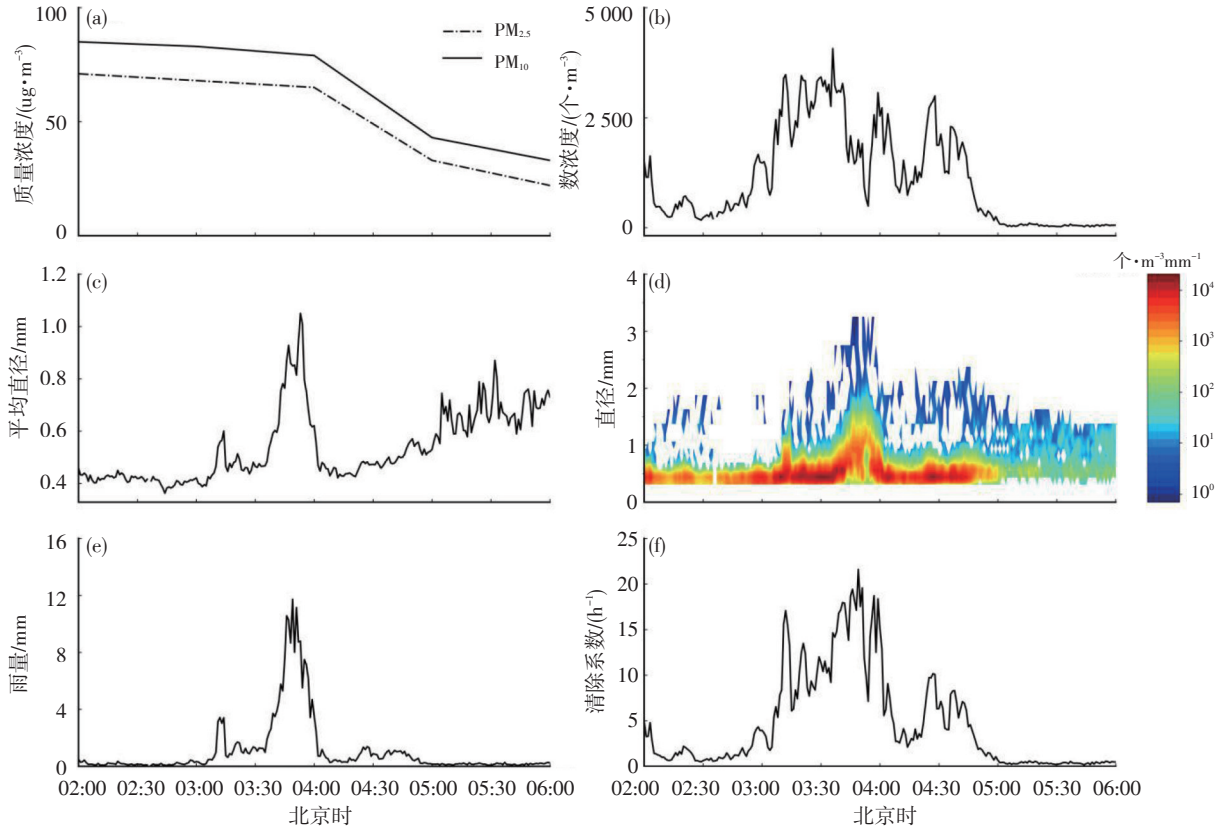


图6 2018年2月10日02:00—06:00的$PM_{2.5}$和PM_{10}质量浓度(a),雨滴数浓度(b),雨滴平均直径(c),雨滴谱(d),分钟雨强(e),清除系数(f)时间演变图

Fig. 6 The time evolution diagrams of the (a) mass concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10}, (b) raindrop number concentration, (c) raindrop mean diameter, (d) raindrop spectra, (e) minute rain intensity , (f) removal rates from 02:00 BT to 06:00 BT on February 10, 2018

时间增加而增大,但是当降水持续时间大于6 h, $PM_{2.5}$和PM_{10}清除率随降水持续时间增加不明显。

综上所述,降水量越大、降水持续时间越长,清除率越大,清除效果越明显,大雨个例中,降水持续时间大于6 h后,清除率变化对降水持续时间增大不敏感。

2.3 雨滴谱分布对$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度的影响

选取四川盆地西南部乐山市4次污染事件,通过雨滴尺度、下降末速度和碰并系数等计算清除系数,以更精细了解降水特征对四川盆地$PM_{2.5}$、PM_{10}的清除作用。4次污染事件发生时间段分别为2018年2月10日02:00—06:00(北京时,下同)、2018年4月13日00:00—08:00、2018年4月21日00:00—03:00和2021年12月7日03:00—07:00。4次污染事件风速较小,最大风速不超过3.8 $m·s^{-1}$,伴随降水的发生,降水天气现象仪观测到明显的降水,雨滴谱分布影响$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度。

从图6可见2018年2月10日02:00—06:00主要污染物为$PM_{2.5}$,02:00—03:00降水天气现象仪观测到有降水,雨滴数浓度、平均直径较小,无明显峰值,谱宽较小,数密度较小,$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度下降不明显,$PM_{2.5}$下降速率3 $\mu g·m^{-3}·h^{-1}$,PM_{10}下降速率2 $\mu g·m^{-3}·h^{-1}$。03:00—04:00,雨滴平均直径出现峰值,03:46,数浓度峰值为4 070 个·cm^{-3},3:53平均直径峰值为1.05 mm,降水量峰值为8.78 mm, $PM_{2.5}$下降速率3 $\mu g·m^{-3}·h^{-1}$,PM_{10}下降速率为4 $\mu g·m^{-3}·h^{-1}$。04:00—06:00有降水,雨滴平均直径减小,降水量减小,雨滴数浓度最大值为2 994 个·cm^{-3},$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度急剧降低,$PM_{2.5}$下降速率21.5 $\mu g·m^{-3}·h^{-1}$,PM_{10}下降速率为23 $\mu g·m^{-3}·h^{-1}$。由此可见,有降水时$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度下降,急速下降出现在雨滴平均直径有显著峰值后,$PM_{2.5}$和PM_{10}质量浓度变化趋势基本一致。由图6f可见,2018年2月10日02:00—06:00降水过程的清除系数在03:49出现第一次峰值(21.59 h^{-1}),04:00—06:00 $PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度迅速下降,在04:27出现第二次峰值(10.16 h^{-1}),此次降水过程清除系数的平均值(4.65 h^{-1})。

从图7可见2018年4月13日00:00—08:00的主要污染物为$PM_{2.5}$,00:00—03:00有降水,PM_{10}平均下降速率为2.33 $\mu g·m^{-3}·h^{-1}$,$PM_{2.5}$无明显变化,03:00—04:00雨滴谱出现峰值,03:11数浓度峰值为2 909 个·cm^{-3},平均直径峰值为0.59 mm,对应谱宽变大,数密度出现大值中心,降水量峰值为4.96 mm,PM_{10}下降速率为9 $\mu g·m^{-3}·h^{-1}$,$PM_{2.5}$下降速率为2 $\mu g·m^{-3}·h^{-1}$,$PM_{2.5}$、PM_{10}

污染清除效果不明显。04∶00—08∶00，数浓度出现一个上升过程后维持在一个较大值范围，平均直径、数浓度、雨量和谱宽出现3次峰值和加宽，$PM_{2.5}$平均下降速率为14 μg·m^{-3}·h^{-1}，PM_{10}平均下降速率为20 μg·m^{-3}·h^{-1}，$PM_{2.5}$、PM_{10}污染清除效果显著。由此可见，有降水时$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度下降，$PM_{2.5}$和PM_{10}质量浓度变化趋势基本一致，$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度的急速下降出现在雨滴谱有显著峰值后。由图7f可见，2018年4月13日00∶00—08∶00降水过程清除系数有5次峰值，02∶07第一次峰值为7.16 h^{-1}，03∶13第二次峰值为11.27 h^{-1}，04∶00—08∶00 $PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度迅速下降，04∶56第三次峰值为10.3 h^{-1}，06∶29第四次峰值为22.56 h^{-1}，07∶49分第五次峰值为12∶56 h^{-1}，此次降水过程清除系数的平均值为4.3 h^{-1}。

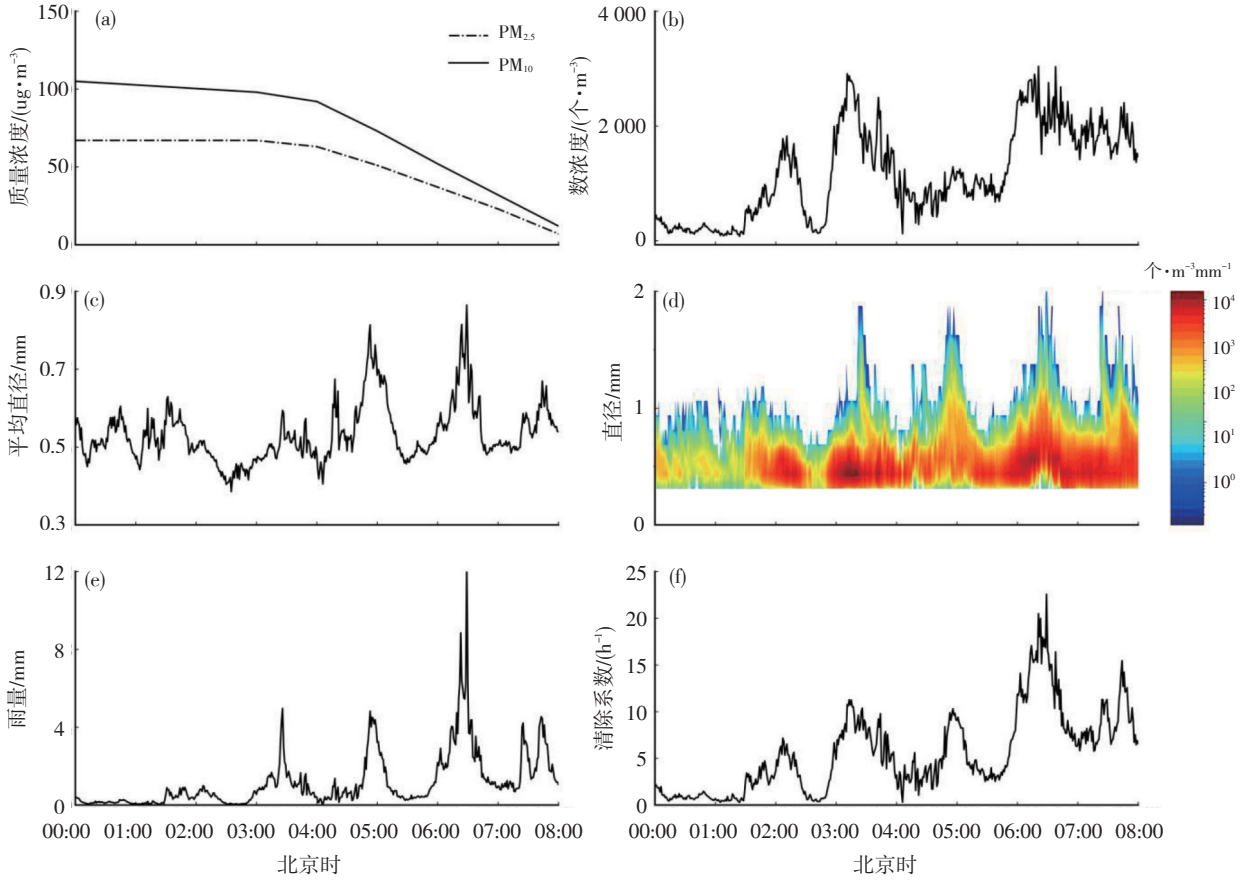


图7 同图6，时间为2018年4月13日00∶00—08∶00

Fig. 7 Same as fig. 6, but from 00∶00 BT to 08∶00 BT on April 13, 2018

从图8可见，2018年4月21日00∶00—03∶00主要污染物为$PM_{2.5}$，00∶00—01∶00时，雨滴谱出现峰值，数浓度和平均直径急速上升出现峰值，00∶24平均直径峰值为1.07 mm，00∶25雨量峰值为38.3 mm，00∶26数浓度峰值为1 178 个·cm^{-3}，对应谱宽变宽，雨滴数密度出现较大值，$PM_{2.5}$下降速率为25 μg·m^{-3}·h^{-1}，PM_{10}下降速率为30 μg·m^{-3}·h^{-1}，清除效果明显。01∶00—03∶00有降水，雨滴谱无明显峰值，雨滴平均直径维持在较大值，PM_{10}平均下降速率为19.5 μg·m^{-3}·h^{-1}，$PM_{2.5}$平均下降速率为17 μg·m^{-3}·h^{-1}，清除效果仍然显著，由此可见，$PM_{2.5}$和PM_{10}质量浓度变化趋势基本一致，$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度急速下降出现在雨滴明显峰值特征的小时内和之后的降水过程中。由图8f可见，2018年4月21日00∶00—03∶00降水过程$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度迅速下降，清除系数00∶26出现峰值为14.7 h^{-1}，峰值后清除系数维持在较大值，此次降水过程清除系数平均值为4.3 h^{-1}。

从图9可见2021年12月7日03∶00—06∶00主要污染物为PM_{10}，03∶00—04∶00出现两次峰值特征，雨滴数浓度和雨量在03∶08峰值为1 512 个·cm^{-3}和0.57 mm，谱宽略变大，对应数密度出现大值中心，03∶59雨滴数浓度、平均直径和雨量再次出现峰值，分别为2 734 个·cm^{-3}、0.52 mm、1.68 mm，谱宽变大，对应数密度出现大值中心，PM_{10}下降速率为42 μg·m^{-3}·h^{-1}，$PM_{2.5}$下降速率为6 μg·m^{-3}·h^{-1}，降水对PM_{10}清除效果显著。04∶00—6∶00有降水，雨滴无明显峰值特征，PM_{10}平均下降速率为52.5 μg·m^{-3}·h^{-1}，$PM_{2.5}$平均下降速率为35 μg·m^{-3}·h^{-1}，由此可见，PM_{10}质量浓度急速下降出现在降水开始，$PM_{2.5}$质量浓度急速下降出现在雨滴谱有显著峰值后。由图9f可见，2021年12月7日03∶00—

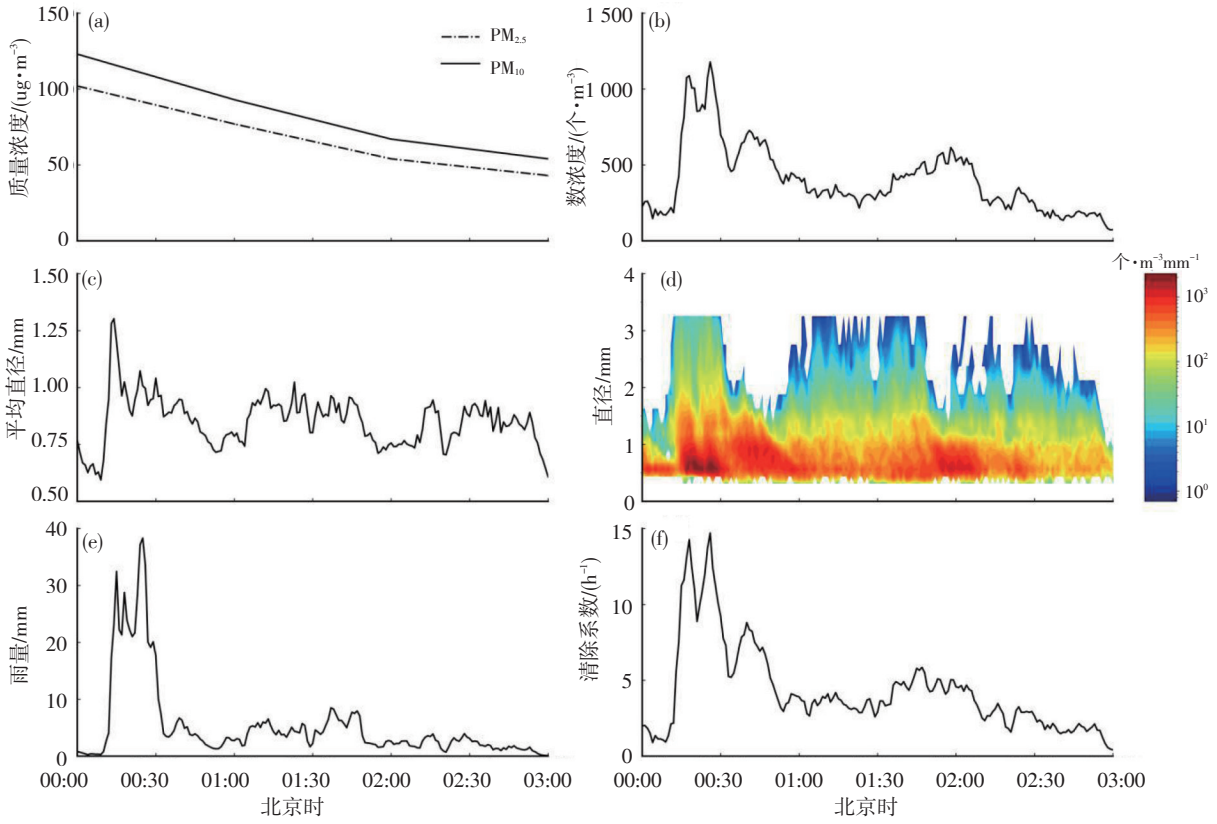


图8 同图6,时间为2018年4月21日00:00—03:00

Fig. 8 Same as fig. 6, but from 00:00 BT to 03:00 BT on April 21, 2018

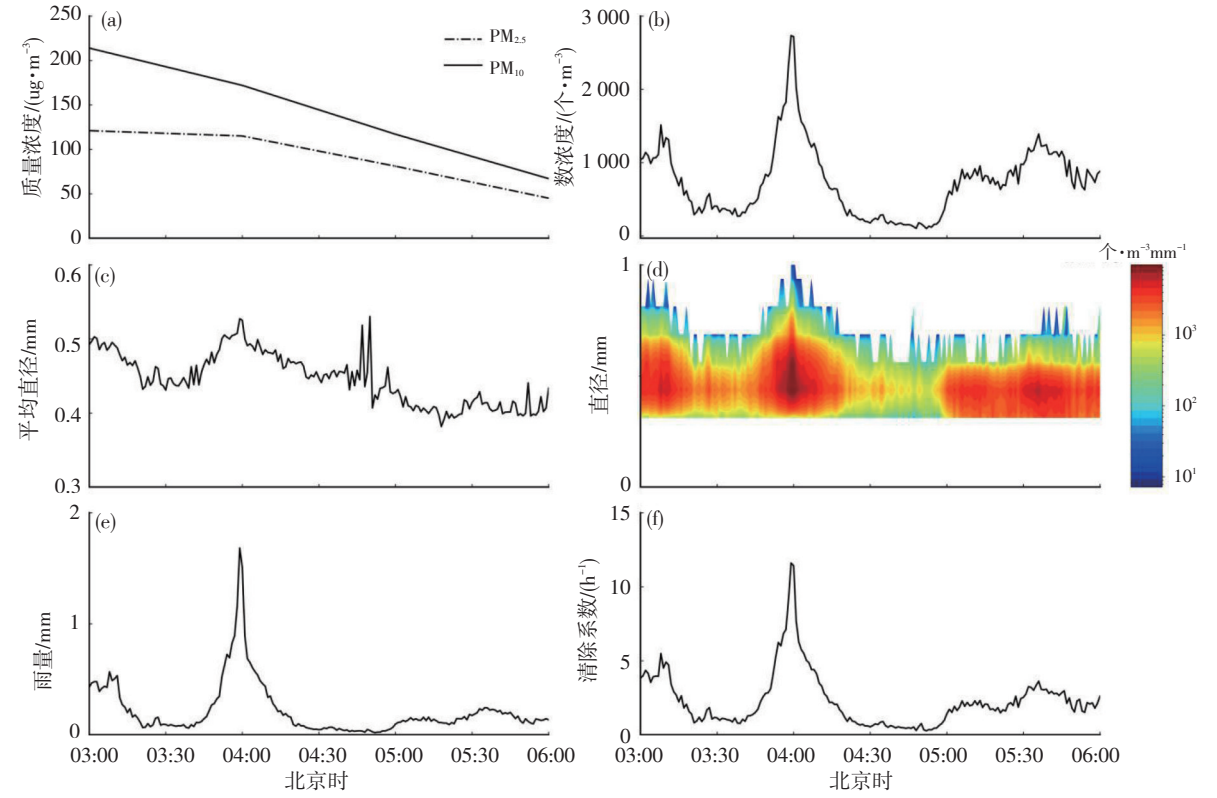


图9 同图6,时间为2021年12月7日03:00—06:00

Fig. 9 Same as fig. 6, but from 03:00 BT to 06:00 BT on December 7, 2021

06:00降水过程主要污染物为PM_{10},清除系数有3次峰值,03:10出现第一次峰值为4.91 h^{-1},$PM_{2.5}$质量浓度变化不明显,PM_{10}质量浓度迅速降低。03:59出现第二次峰值为11.6 h^{-1},04:00—06:00 $PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓

度迅速下降,05:36出现第三次峰值为3.62 h^{-1},此次降水过程清除系数平均值为2.3 h^{-1}。

综上所述,$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度在雨滴谱出现峰值特征小时内或之后迅速下降,当雨滴谱分布特征显著变化时,$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度也发生显著变化。清除系数能描述降水对$PM_{2.5}$和PM_{10}清除效果,主要污染物为$PM_{2.5}$的降水过程,当清除系数峰值小于10 h^{-1},$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度下降不明显,当清除系数峰值大于10 h^{-1},$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度在小时内或之后降水中急速下降;主要污染物为PM_{10}的降水过程,当清除系数出现峰值,则PM_{10}急速下降,$PM_{2.5}$下降不明显,当清除系数峰值大于10 h^{-1}后,$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度急速下降。

3 结论和讨论

本文利用2016—2021年四川盆地90个环境监测站$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度资料和17个地面气象站观测资料,分析了四川盆地降水和$PM_{2.5}$、PM_{10}的空间分布特征,采用清除率和清除系数描述降水对污染物的清除作用,分析降水强度、时长及雨滴谱分布对$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度影响,探讨降水对$PM_{2.5}$、PM_{10}的清除机制,得出主要结论如下:

(1) 四川盆地$PM_{2.5}$空间分布自南向北呈高-中-低特征,PM_{10}与降水空间分布特征刚好相反,自西向东依次是低-高-低(高-低-高),PM_{10}污染较为严重区域为盆地西北部成都—绵阳一带;非降水时段$PM_{2.5}$和PM_{10}的质量浓度比年平均浓度高,降水对$PM_{2.5}$、PM_{10}湿清除作用明显。

(2) 降水强度越大,降水持续时间越长,对$PM_{2.5}$和PM_{10}的清除作用越明显,大雨个例中,$PM_{2.5}$和PM_{10}清除率最大值分别可达92.6%和92.5%,小雨和中雨个例中,清除率对降水时间的敏感性强,大雨个例中,降水时间小于6 h,随着降水时间增加清除率增大明显,降水时间大于等于6 h后,清除率对降水时间增加变化不明显。

(3) 对4次典型$PM_{2.5}$、PM_{10}污染事件降雨湿清除效果分析得出,雨滴谱分布影响$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度,当雨滴直径、雨滴总数和雨量等降水特征量出现峰值,雨滴谱加宽变强时,$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度在小时内或之后快速下降。当污染事件中主要污染物是$PM_{2.5}$,清除系数峰值在10 h^{-1}以上,降水对$PM_{2.5}$和PM_{10}清除效果显著;当污染事件中主要污染物是PM_{10},清除系数出现峰值后,降水对PM_{10}清除效果显著,对$PM_{2.5}$清除效果不显著,当清除系数峰值在10 h^{-1}以上,降水对$PM_{2.5}$和PM_{10}清除效果显著。

本文仅用了近几年四川省内的观测数据进行研究,由于降水对$PM_{2.5}$和PM_{10}清除作用受样本长度的影响,且选取典型$PM_{2.5}$、PM_{10}污染事件研究雨滴谱对$PM_{2.5}$、PM_{10}的清除作用,不能得出普适性规律,下一步将收集更加完善的环境监测站$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度资料和地面气象站观测资料,选取更多能代表区域$PM_{2.5}$、PM_{10}污染事件,进一步完善四川盆地降水对$PM_{2.5}$、PM_{10}的清除机制的研究。

参考文献(References):

曹杨,刘炜桦,王晨曦,等.2020.成都市降水对大气污染物的清除效果分析[J]. 环境科学研究,33(2):305-311. Scavenging effect of precipitation on removal of atmospheric pollutants in Chengdu city [J]. Research of Environmental Sciences,33(2):305-311 (in Chinese). doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2019.08.15

范凡,陆尔,葛宝珠,等.2019.降水对江浙沪$PM_{2.5}$的清除效率研究[J].气象科学,39(2):178-186. Fan F, Lu E, Ge B Z, et al. 2019. Analysis on scavenging effect of precipitation on $PM_{2.5}$ in Jiangsu,Zhejiang and Shanghai area [J]. Journal of the Meteorological Sciences,39(2):178-186 (in Chinese). doi:10.3969 /2018jms.0028

环境保护部.2012.环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行):HJ633-2012[S].北京:中国环境监测总站.Ministry of Environmental Protection.2012. Technical regulation on ambient air quality index (on trial): HJ633-2012 [S]. Beijing:China National Environmental Monitoring Cerntre (in Chinese)

李培荣,肖天贵.2020.成都地区秋冬季污染天气形势下$PM_{2.5}$的扩散与输送[J].中国环境科学,40(1):63-75. Li P R, Xiao T G. 2020. The diffusion and transport of $PM_{2.5}$ under the polluted weather conditions during autumn and winter seasons in Chengdu [J]. China Environmental Science,40(1):63-75 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-005

林丹,郭晓梅,王维佳.2023.四川盆地不同区域城市降水过程对$PM_{2.5}$清除作用分析[J].干旱气象.41(4):620-628. Lin D, Guo X M, Wang W J. 2023. Analysis on scavenging effect of precipitation processes on $PM_{2.5}$ in different cities of Sichuan Basin [J]. Journal of Arid Meteorology,41(4):620-628 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2023)-04-0620

栾天,郭学良,张天航,等.2019.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,30(3):279-291. Luan T, Guo X L, Zhang T H, et al. 2019. The scavenging process and physical removing mechanism of pollutant aerosols by different precipitation intensities [J]. Journal of Applied Meteorological Science,30(3):279-291 (in Chinese). doi:10.11898/10017313.20190303

邱玉珺,陆春松,郭凤霞,等.2020.大气气溶胶物理学[M].北京:气象出版社:77. Qiu Y J, Lu C S, Guo F X, et al. 2020. Physics of clouds and precipitation [M]. Beijing:Mereorological Press:77 (in Chinese)

唐仁茂,李德俊,柳草,等.2017.一次重雾霾天气成因及湿清除特征分析[J].气候与环境研究,110(6):699-707. Tang R M, Li D J, Liu C, et al. 2017. Characteristic analysis of a Muti-Day pollution event and wet removal of aerosols [J]. Climatic and Environmental Research,110(6):699-707 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16187

王聪聪,张小玲,卢宁生.2023. 2019—2021年四川盆地污染天气客观分型及典型污染个例研究[J].中国环境科学,43(5):2182-2197. Wang C C, Zhang X L, Lu N S. 2023. Objective classification of pollution

weather and typical pollution cases in Sichuan Basin from 2019 to 2021 [J]. China Environmental Science,43(5):2182–2197 (in Chinese). doi:10.19674/j.cnki.issn1000–6923.20230103.002

王瑛,朱彬,康汉青,等.2014.气溶胶云下清除理论及观测研究[J].中国科学院大学学报,31(3):306–313,321. Wang Y, Zhu B, Kang H Q, et al. 2014. Theoretical and observational study on below –cloud rain scavenging of aerosol particles [J]. Journal of University of Chinese Academyof Sciences,31(3):306–313,321(in Chinese).doi:10.7523/j.issn.2095–6134.2014.03.003

文雯,刘自牧.2023.成都市一次重雾霾过程成因及污染源的HYSPLIT模式分析[J].沙漠与绿洲气象,17(3):87–92. Wen W, Liu Z M. 2023. Causes of a heavy Fog–haze process and HYSPLIT Model of its pollution sources in Chengdu [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(3):87–92 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2023.03.012

武高峰,王丽丽,董洁,等.2021.北京城区降水对$PM_{2.5}$和PM_{10}清除作用分析[J].中国环境监测, 211(3):83–92. Wu G F, Wang L L, Dong J, et al. 2021. Effects of precipitation on the removal of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Beijing Urban Area [J]. Environmental Monitoring in China, 211(3):83–92 (in Chinese). doi:10.19316/j.issn.1002–6002.2021.03.11

吴亚平,张琦,王炳赟,等.2020.四川雅安三种主要大气污染物浓度与气象条件的关系及其预测研究[J]. 高原气象.39(4):889–898. Wu Y P, Zhang Q, Wang B Y, et al. 2020. The forcast of three major atmospheric pollutants concen–trations and its relationships with meteorological factors in Ya'an, Sichuan Province [J]. Plateau Meteorology,39(4):889–898 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2019.00115

杨军,陈宝君,银燕,等. 2001.云降水物理学[M].北京:气象出版社:88–92. Yang J, Chen B J, Yin Y, et al. 2001. Atmospheric aerosol physics [M]. Beijing: Meteorological Press:88–92 (in Chinese)

姚克亚,郭俊,傅云飞,等.1999.气溶胶粒子的降雨清除[J].气候与环境研究,4(3):297–302. Yao K Y, Guo J, Fu Y F, et al. 1999. Rain scavenging of aerosol particles [J]. Climatic and Environmental Research,4(3):297–302 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9585.1999.03.11

于人杰,康平,任远,等.2020.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,333(8):990–995. Yu R J, Kang P, Ren Y L, et al. 2020. Observational study on precipitation wet removal of atmospheric particulate matter in Chengdu [J]. Environmental Pollution and Control,333(8):990–995 (in Chinese). doi:10.15985/j.cnki.1001–3865.2020.08.011

张秋晨,王文青.2023.山东省三个不同区域降水雨滴谱特征的对比分析[J].暴雨灾害,42(5):585–594. Zhang Q C, Wang W Q. 2023. Comparison study of raindrop size distribution in three regions of Shandong province [J]. Torrential Rain and Disasters,42(5):585–594 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022–187

Andronache C. 2003. Estimated variability of below–cloud aerosol removal by rainfall for observed aerosol size distribution [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,3(6):131–143. doi:10.5194/acp–3–131–2003

Bae S Y, Park R J, Kim Y P, et al. 2012. Effects of below–cloud scavenging on the regional aerosol budget in East Asia [J]. Atmospheric Environment,58:14–22. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.08.065

Pranesha T S, Kamra A K. 1997. Scavenging of aerosol particles by large water drops: 3. Washout coefficients, half–lives, and rainfall depths [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,102 (D20):23947–23953. doi:10.1029/97JD01835

Scott B C.1982. Theoretical estimates of the scavenging coefficient for soluble aerosol particles as a function of precipitation type, rate and altitude [J]. Atmospheric Environment,16(7):1753–1762. doi:10.1016/0004–6981(82)90268–2

Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J. 2010. Correlations between fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of $PM_{2.5}$ to climate change [J]. Atmospheric Environment,44(32):3976–3984. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.06.060

(责任编辑 张 文)