

## 夏季降水对合肥市大气污染物的影响

程钊强<sup>1,2</sup>, 李祥<sup>2,3</sup>, 刘念<sup>2</sup>, 姚瑶<sup>2,4</sup>, 文想成<sup>2,5</sup>, 杨书运<sup>2\*</sup>

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036;  
3. 中山大学大气科学学院, 珠海 519082; 4. 湖北省气象局, 武汉 430074; 5. 芜湖市气象局, 芜湖 241006)

**摘要:** 利用合肥市 2015—2017 年大气污染 (PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub> 和 PM<sub>10</sub>) 监测数据及气象资料, 对合肥市夏季大气污染物的浓度变化特征以及降水对大气污染物的影响进行分析。结果表明: (1) 2015—2017 年合肥市 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度均有所下降, 气态污染物中只有 NO<sub>2</sub> 浓度呈升高趋势。(2) PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 日变化呈双峰型, 峰值分别出现在 08:00—09:00 和 21:00—22:00, 日浓度的最小值出现在午后 15:00—16:00, 分别为 (51.01±2.72) μg·m<sup>-3</sup> 和 (30.64±1.86) μg·m<sup>-3</sup>。(3) 气态污染物中 O<sub>3</sub> 和 SO<sub>2</sub> 日变化呈单峰型, O<sub>3</sub> 和 SO<sub>2</sub> 峰值分别 (129.35±12.52) μg·m<sup>-3</sup> 和 (11.80±0.77) μg·m<sup>-3</sup>。(4) 降水能使大气污染物浓度特征发生明显变化: 降水条件下 O<sub>3</sub> 浓度波动范围减小, 浓度高值时段明显缩短; NO<sub>2</sub> 和 CO 浓度明显降低, 夜间 NO<sub>2</sub> 浓度约为非降水条件下的 55%~60%, CO 浓度下降 20%; SO<sub>2</sub> 单峰型变化特征消失, 小时浓度维持在 9.66 μg·m<sup>-3</sup>; 降水使 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度降低的同时改变大气中不同粒径颗粒物的质量占比, 降水过程中 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 明显升高, 降水结束后该比值迅速降低。

**关键词:** 合肥; 夏季降水; 大气污染; 浓度变化特征

中图分类号: X51

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2022)04-0638-07

### Influence of summer rainfall on air pollutants in Hefei

CHENG Keqiang<sup>1,2</sup>, LI Xiang<sup>2,3</sup>, LIU Nian<sup>2</sup>, YAO Yao<sup>2,4</sup>, WEN Xiangcheng<sup>2,5</sup>, YANG Shuyun<sup>2</sup>

(1. School of Environment Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044; 2. School of Resource and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036; 3. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082; 4. Hubei Meteorological Bureau, Wuhan 430074; 5. Wuhu Meteorological Bureau, Wuhu 241006)

**Abstract:** Using the monitoring data of atmospheric pollution (PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub> and PM<sub>10</sub>) and meteorological data from 2015-2017 in Hefei, the characteristics of concentration changes of atmospheric pollutants in Hefei in summer and the influence of precipitation on atmospheric pollutants were analyzed. The results showed that: (1) The concentration of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> declined from 2015 to 2017, and only NO<sub>2</sub> in the gaseous pollutants showed an upward trend. (2) Diurnal variations of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> displayed a bimodal pattern the peak values were (51.01±2.72) μg·m<sup>-3</sup> at 8:00-9:00 and 21:00-22:00, and the lowest values were (30.64±1.86) μg·m<sup>-3</sup> at 15:00-16:00. (3) Diurnal variation of O<sub>3</sub> and SO<sub>2</sub> displayed unimodal, the peak values were (129.35±12.52) μg·m<sup>-3</sup> and (11.80±0.77) μg·m<sup>-3</sup>, respectively. (4) Summer precipitation can obviously affect air pollutants: O<sub>3</sub> concentration fluctuation range reduced and the period of peak value shortened significantly; the concentrations of NO<sub>2</sub> and CO declined obviously, NO<sub>2</sub> night-value was about 55%-60% of non-precipitation conditions, and CO declined by 20%; the unimodal variation of SO<sub>2</sub> disappeared, and hourly concentration maintained at 9.66 μg·m<sup>-3</sup>; both PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> concentration reduced, and the mass percentage of different size particles changed in precipitation, the ratio of PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> increased obviously during precipitation, and declined rapidly after precipitation.

**Key words:** Hefei; summer rainfall; air pollution; concentration characteristics

随着社会经济的发展以及人类活动范围和强度的扩大, 伴随产生了大量污染物<sup>[1]</sup>。以大气颗粒物、低空 O<sub>3</sub> 以及多种前体物为代表的大气污染物被排放至大气后<sup>[2]</sup>, 对生态环境造成了不可忽视的负面

收稿日期: 2021-09-09

基金项目: 国家自然科学基金 (41771100) 和安徽省省级大学生创新基金 (201810364204) 共同资助。

作者简介: 程钊强, 硕士研究生。E-mail: lyucheng729@outlook.com

\* 通信作者: 杨书运, 博士, 教授。E-mail: yangshy0852@163.com

影响,尤其在秋冬两季,其浓度的增加对人体健康和生态环境都会产生很大影响<sup>[3]</sup>。这些污染物增强了太阳辐射的散射和吸收,导致到达地表的太阳辐射量大量减少,大气接收的太阳辐射相应增加<sup>[4]</sup>,大气温度结构的变化抑制了降水的产生以及污染物的沉降效率<sup>[4-5]</sup>。

国内外很多学者对大气颗粒物和污染气体展开了相关研究。大气污染物有明显的时空变化特征,李景鑫等<sup>[6]</sup>分析了我国主要城市的颗粒污染物,发现 PM<sub>2.5</sub> 浓度在冬季达到最高,春、夏次之,夏季最低;高歌<sup>[7]</sup>对我国大气污染物和霾日研究,发现其空间分布特征均成东多西少态势;李小飞等<sup>[3]</sup>分析了 2001—2010 年夏秋两季全国观测资料,认为季风带来的降水和近地面旺盛的热力对流,有利于污染物的稀释和扩散;王淑兰等<sup>[8]</sup>结合气象因素分析了珠江三角洲各个城市之间污染相互影响的规律,发现各城市空气质量在相当程度上受外地源排放的控制;高丽波等<sup>[9]</sup>对南京市夏季污染浓度特征观测分析,发现气体污染物和不同粒径颗粒污染物日变化在城区、郊区存在明显差异。

大气污染物主要通过干沉降和湿沉降两种过程从大气中清除<sup>[10-12]</sup>,不同天气过程对污染物浓度变化的影响存在差异。降水对大气污染物的清除主要包括降水对颗粒物的清除和对污染气体的清除,降水对颗粒物的清除主要通过惯性碰并过程和布朗扩散作用;对气体而言,云滴形成以后吸收大气中微量气体,通过降雨将这些微量气体带到地面<sup>[10, 13-14]</sup>。王瑛等<sup>[15]</sup>对比气溶胶在雷暴与非雷暴天气条件下清除效率,发现雷暴天气下,雨滴对气溶胶的清除作用明显强于非雷暴天气;Deng 等<sup>[16]</sup>对珠三角地区 2012—2013 年大气污染物浓度变化研究,发现 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度同时激增事件的发生与台风活动有关;胡敏等<sup>[17]</sup>分析夏季高温高湿和降水过程对大气颗粒物的影响,发现夏季降水过程对细颗粒物去除作用最为明显。

上述研究主要着眼于大气污染物的季节性、空间性特征,以及天气过程前后污染物浓度的变化,缺乏对降水过程中大气污染物动态变化的关注。鉴于此,作者在合肥市选取 10 个空气质量监测站点,探究污染物随降水过程的变化以及不同粒径颗粒在降水影响下的沉降差异,研究夏季(6—8 月份)降水对污染物的清除作用。

## 1 数据与方法

大气污染物浓度数据来源于安徽省生态环境监

测站,10 个国控环境监测点分别为高新区站点、滨湖新区站点、包河区站点、琼海区站点、庐阳区站点、长江中路站点、董铺水库站点、琥珀山庄站点、三里街站点和明珠广场站点,其中董铺水库站点为对照点。以上环境监测点中除了高新区和董铺水库附近居民生活区相对较少,其他 8 个站点位于人口稠密城区。降水资料来源于国家级气象观测站和安徽农业大学观测点。国控环境监测站和安徽农业大学观测点位置如表 1 所示。

表 1 观测站点地理位置  
Table 1 Locations of observing sites

观测点	经度/°	纬度/°
三里街	117.323	31.879
长江中路	117.279	31.867
庐阳区	117.271	31.885
明珠广场	117.225	31.780
瑶海区	117.316	31.864
包河区	117.317	31.799
琥珀山庄	117.274	31.869
滨湖新区	117.306	31.740
高新区	117.142	31.838
董铺水库	117.208	31.895
安徽农业大学	117.255	31.862

安徽农业大学观测点主要用以获取温度、降水、风速和湿度等气象要素数据,每小时记录一次。雨强、雨滴谱以及逐小时降水量由安徽农业大学内 LNM 激光雨滴谱仪所观测,LNM 激光雨滴谱仪测量的降水量、降水强度的精度分别为 0.001 mm 和 0.001 mm·h<sup>-1</sup>。降水过程以安徽农业大学观测点雨滴谱仪记录为准。

## 2 结果与分析

### 2.1 夏季大气污染物浓度水平

表 2 为 2015—2017 年合肥市夏季 PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub> 和 PM<sub>10</sub> 各年日平均浓度以及多年日平均浓度。除 NO<sub>2</sub> 外,其他大气污染物的夏季浓度值变化波动相对较小。夏季大气活动比较活跃、大气层结不稳定,利于颗粒污染物的扩散<sup>[6]</sup>,季风性降水天气有利于颗粒物湿沉降过程的发生<sup>[12]</sup>,夏季辐射充足使光化学反应旺盛,并且存在有前体物输送的影响,因此造成不同污染物的浓度特征存在差异。

各年污染物浓度变化,PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的夏季浓度均值分别为 (37.08±2.88) μg·m<sup>-3</sup>、(10.49±0.73) μg·m<sup>-3</sup>、(31.82±6.43) μg·m<sup>-3</sup>、(0.78±0.05) μg·m<sup>-3</sup>、(81.83±26.62) μg·m<sup>-3</sup> 和 (63.24±5.15) μg·m<sup>-3</sup>。PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的夏季均值波动较小且变化趋势相似。2015—2017

年  $\text{NO}_2$  的夏季浓度均值逐年升高, 其中 2017 年夏季浓度相较于 2016 年升高 15%, 可能与 2017 年夏季降水减少 (表 3) 以及  $\text{NO}_x$  排放量增加有关。合肥市 3 年来夏季  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  分别为 0.58、0.61 和

0.60, 根据赵辉等的研究, 当该比值大于 0.6 时大气颗粒污染物的主要来源发生改变<sup>[18]</sup>, 可能是人类活动导致更多有机碳和硫酸盐等二次气溶胶生成, 从而导致了  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的增加。

表 2 夏季大气污染物浓度水平

年份	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_2$	CO	$\text{O}_3$	$\text{PM}_{10}$
2015	36.54±3.09	10.06±0.62	30.80±6.61	0.77±0.05	79.32±27.62	64.47±6.01
2016	38.98±3.26	10.63±0.76	32.97±7.25	0.84±0.05	80.58±30.42	65.92±6.78
2017	35.62±3.94	10.18±0.44	31.74±8.01	0.70±0.05	93.22±33.68	60.56±6.76
年平均	37.08±2.88	10.49±0.73	31.82±6.43	0.78±0.05	81.83±26.62	63.24±5.15

表 3 2015—2017 年夏季降水日数

月份	2015 年	2016 年	2017 年
6 月	9	6	2
7 月	8	7	4
8 月	4	4	9
总计	21	17	15

注: 取 24 h 雨量大于 5 mm。

## 2.2 大气污染物浓度日变化特征

**2.2.1 气态污染物浓度日变化** 气态污染物浓度日变化曲线如图 1 所示, 气态污染物的日浓度表现为双峰型 ( $\text{NO}_2$ 、CO) 和单峰型 ( $\text{O}_3$ 、 $\text{SO}_2$ ) 两种变化特征。双峰型中  $\text{NO}_2$  浓度日变化的峰值分别出现在 8:00 和 22:00 左右, 其中夜间峰值明显高于白天,

浓度最低值出现在正午 (12:00—13:00), 浓度的最低值约为峰值浓度的 50%。CO 浓度日变化曲线比较平滑, 白天和夜间的峰值分别为 ( $0.831\pm 0.04$ ) 和 ( $0.803\pm 0.08$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 其中夜间峰值相比白天峰值略低。 $\text{O}_3$  浓度与呈双峰型变化的污染物在位相上相反, 与张璐瑶等<sup>[19]</sup>等“ $\text{O}_3$  浓度日变化与颗粒物位相明显相反”的结论相一致。日出后  $\text{O}_3$  浓度快速升高, 并从正午开始维持较高浓度值至下午 17:00 左右, 夜间至次日清晨  $\text{O}_3$  浓度维持较低水平。 $\text{SO}_2$  浓度在 06:00—12:00 时间段存在一个“激增—恢复”过程, 其他时段浓度值维持在一个稳定范围 ( $9.85\pm 0.32$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 在 09:00 左右出现浓度峰值后迅速下降, 并在正午恢复到稳定浓度。

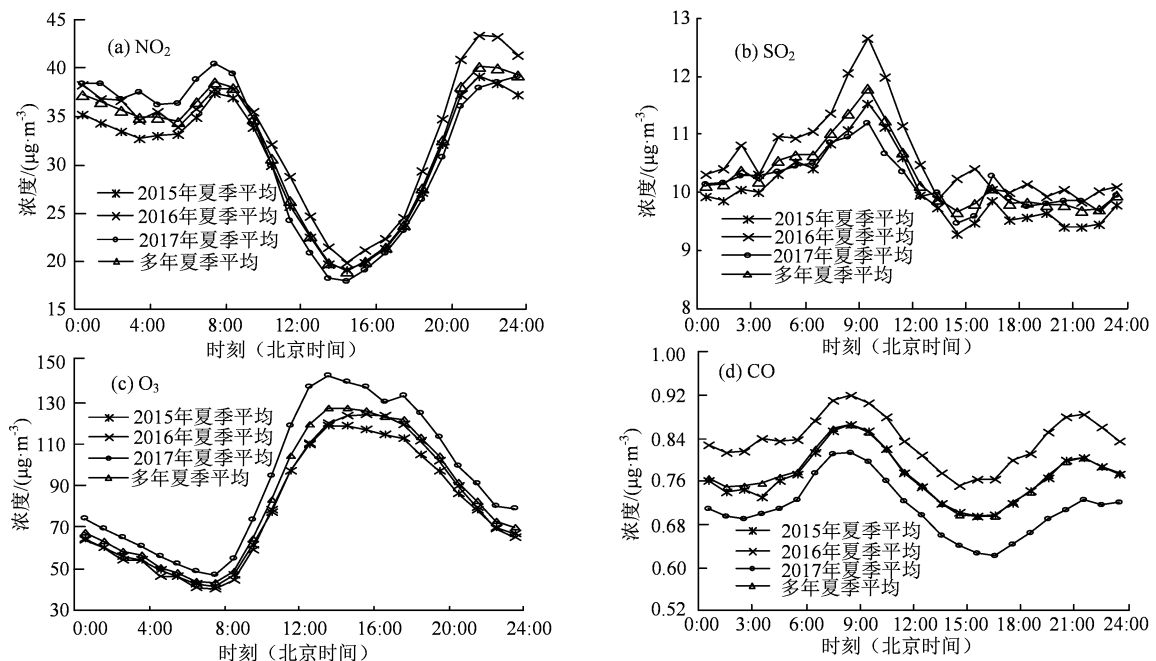


图 1 夏季气态污染物浓度日变化

Figure 1 Diurnal variation of major atmospheric pollutants in summer

**2.2.2 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度日变化** 2015—2017 年夏季大气污染物浓度日变化如图 2 所示。PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 在一天中 (00:00-23:00) 呈现双峰型变化特征, PM<sub>2.5</sub> 浓度的 2 个峰值分别出现在 08:00—09:00 和 21:00—22:00, 在达到第 1 个极大值(41.94±0.88)μg·m<sup>-3</sup> 后迅速下降至当天浓度的最低值 (15:00 左右), 而后开始上升并于 22:00 达到第 2 个峰值, 其中 PM<sub>2.5</sub> 夜间峰值明显低于白天; 双峰特征在 PM<sub>10</sub> 的日浓度变化中更为明显, 不同于 PM<sub>2.5</sub> 白天峰值高于夜间峰值, PM<sub>10</sub> 两峰值浓度基本相同, 在 21:00 左右达到第 2 个峰值后先迅速降至低于该峰值的相对稳定浓度

(64.95±1.57) μg·m<sup>-3</sup>, 并维持该浓度至清晨 (05:00) 后开始上升达到次日的第 1 个峰值。双峰型日变化特征可能与人为活动和气象因素有关, 白天峰值主要是由于该时段为上班高峰期, 车流量以及气温对颗粒物新生过程的带动, 从而导致 PM<sub>2.5</sub> 的剧增。陈武等研究表明 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化受温度影响, 温度梯度的减小有利于垂直方向上的湍流带动空气中的细颗粒向上运动, 使 PM<sub>2.5</sub> 混合均匀从而浓度降低<sup>[20]</sup>, 与本研究中浓度日变化的观测结果相一致。由于夜间辐射损失较大且可能有逆温层存在, PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 在垂直方向上不易扩散并沉积, 因而引起浓度的升高。

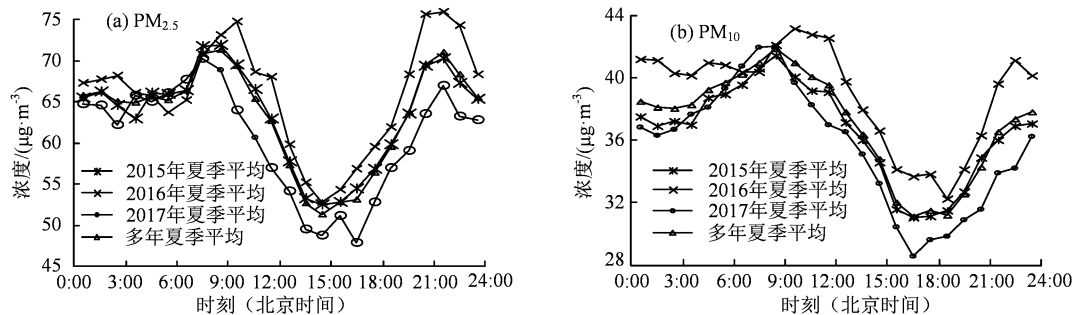


图 2 夏季 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度日变化

Figure 2 Diurnal variation of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in summer

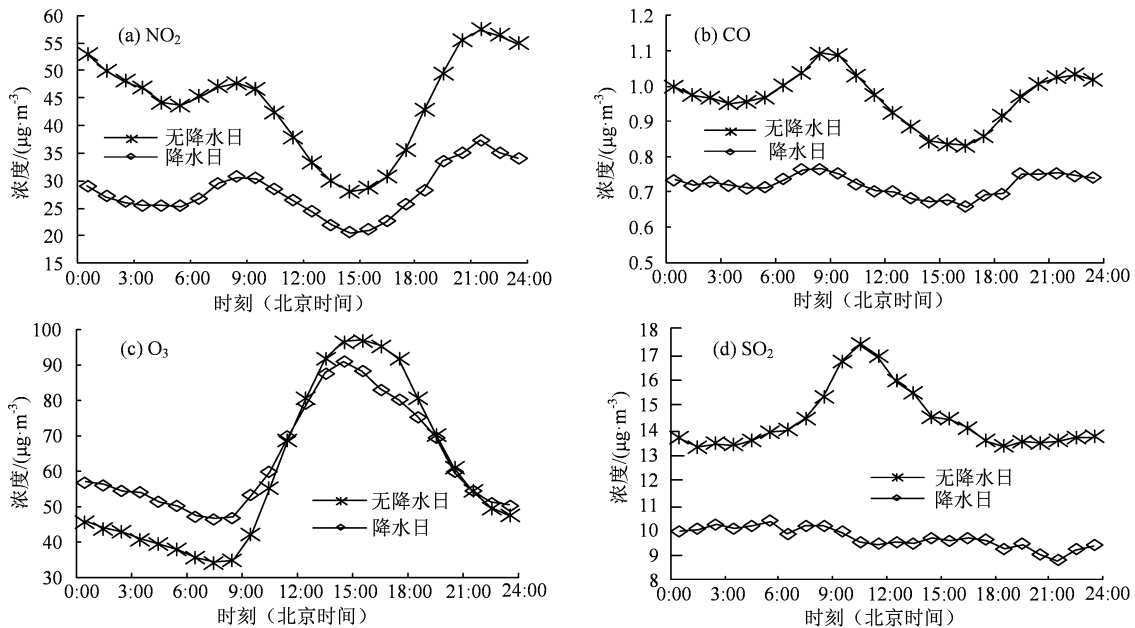


图 3 不同降水条件下 NO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub> 和 SO<sub>2</sub> 浓度日变化

Figure 3 Diurnal variation of NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub> and SO<sub>2</sub> concentrations under different precipitation conditions

### 2.3 夏季降水对大气污染物的清除作用

2015—2017 年夏季降水日数分别为 21 日、17 日、15 日, 其分布如表 2 所示。为进一步研究降水对大气污染物浓度的影响, 以 PM 和气态污染物 (NO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub> 和 SO<sub>2</sub>) 为例, 分析夏季降水对其浓度变化的影响。

#### 2.3.1 降水对气态污染物浓度日变化的影响 气态

污染物 (NO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub> 和 SO<sub>2</sub>) 在降水日和无降水日逐小时平均浓度变化如图 3 所示。对比有无降水发生时污染物浓度的日变化曲线可以看出, 降水日 NO<sub>2</sub>、CO 浓度明显降低, 逐小时浓度曲线特征基本不变, O<sub>3</sub> 的浓度变化特征受降水影响较小, 降水明显改变了 SO<sub>2</sub> 日浓度变化特征。

气态污染物 NO<sub>2</sub> 在降水、无降水条件下的逐小

时浓度变化如图 3(a), 日平均浓度分别为 27.91 和 43.92  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 即夏季降水发生时  $\text{NO}_2$  浓度会明显降低; 比较不同降水条件下相同时刻  $\text{NO}_2$  浓度发现,  $\text{NO}_2$  浓度在夜间降水条件下约为相同时刻无降水条件下的 55%~60%。对比两种条件下  $\text{NO}_2$  浓度在白天达到峰值后的下降过程, 在无降水发生时太阳

辐射可能较强, 光化学反应旺盛,  $\text{NO}_2$  浓度的下降速率明显较大; 两种降水情况下  $\text{NO}_2$  浓度在午后 (15:00) 分别降至 27.98 和 20.53  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。与  $\text{NO}_2$  类似, 降水日 CO 逐小时浓度变化趋势和无降水日一致, 浓度水平下降约 20%, 见图 3(b)。

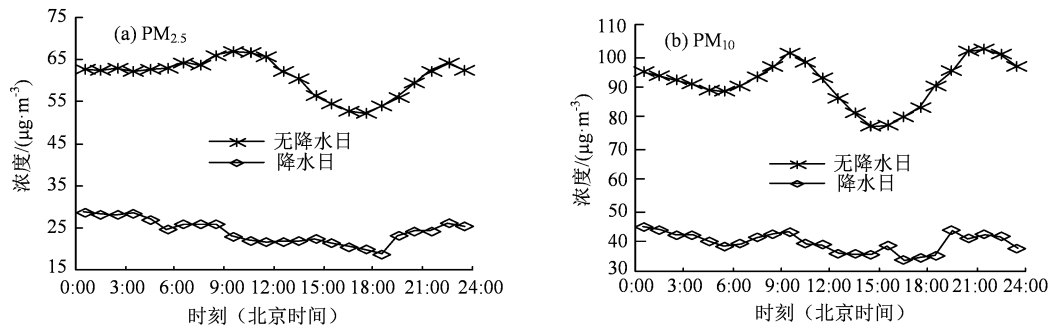


图 4 不同降水条件下  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  浓度日变化

Figure 4 Diurnal variation of  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$  concentration under different precipitation conditions

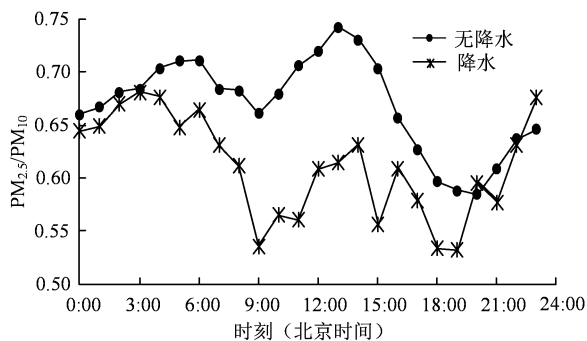


图 5 不同降水条件下  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  日变化

Figure 5 Daily variation of  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  under different precipitation conditions

有、无降水条件下  $\text{O}_3$  浓度水平分别为  $(63.18 \pm 14.78)$  和  $(59.93 \pm 22.42)$   $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 即无降水条件下  $\text{O}_3$  浓度的波动范围更大、变化速率更快 (图 3(c))。不同于无降水条件下  $\text{NO}_2$  各时刻浓度明显高于降水条件下浓度, 无降水条件下  $\text{O}_3$  峰值明显较高,  $\text{O}_3$  日浓度的极小值反之, 即在降水发生时  $\text{O}_3$  浓度波动范围减小。对比两种情况下相同时刻  $\text{O}_3$  浓度可以发现, 夜间无降水发生时的浓度值为降水条件下的 55%~65%; 无降水条件下的  $\text{O}_3$  浓度在日出后迅速上升, 并于 15:00—16:00 左右达到极大值 ( $96.98 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 大于同时刻降水条件下的峰值 ( $90.84 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )。

图 3(d) 显示夏季降水使  $\text{SO}_2$  浓度日变化维持在  $9.66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 对比无降水日浓度波动范围  $13.31 \sim 16.89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  可以发现降水明显改变了  $\text{SO}_2$  日浓度变化特征, 降水日  $\text{SO}_2$  逐小时浓度不再有明显峰值, 另外,  $\text{SO}_2$  逐小时浓度的明显降低表明, 降水可能

使大气中  $\text{SO}_2$  本底浓度发生改变。

对比有无降水发生时气态污染物日变化曲线特征、浓度值波动范围发现, 降水使气体污染物浓度值的波动范围减小, 而对日变化曲线没有明显影响, 原因可能是在降水天气下, 污染物在大气中各时刻的相对稳定浓度发生改变, 且雨天太阳辐射强度较弱, 对光化学反应进行与前体物的输送造成影响。另外, 当降水发生时大气中  $\text{NO}_2$ 、CO 和  $\text{SO}_2$  的本底浓度也相应降低。

**2.3.2 降水对  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  浓度日变化的影响** 图 4 是不同降水条件下颗粒物浓度的日变化曲线。在不受降水这一因素影响时  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  浓度曲线呈双峰型, 两个峰值出现的时段分别为 08:00—09:00、21:00—22:00,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在白天的峰值略高于夜间, 而  $\text{PM}_{10}$  浓度的峰值基本相同; 在 00:00—07:00 这一时段,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度基本稳定,  $\text{PM}_{10}$  存在明显的“下降-上升”变化。当降水发生时, 颗粒污染物的浓度变化规律相对不明显, 白天颗粒物浓度经过小幅上升后持续降低, 在 15:00 左右出现小幅波动, 而后于日落前降至最小值。对比降水条件下白天与夜间颗粒物浓度变化特征发现, 夜间颗粒物浓度波动较小且浓度值高于白天, 造成这一现象的原因可能是夏季对流性降水多发生于白天, 另外降水条件下颗粒污染物浓度变化规律不明显可能与降水时段分布不均匀有关。

不同降水条件下大气中  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  比值如图 5 所示。无降水条件下  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  在白天和夜间的平均值分别为 0.69 和 0.66, 而在降水发生时该值分别

为 0.60 和 0.63, 可以看出降水能够明显改变不同粒径污染物在白天的成分占比。在晚上 20:00 至次日 03:00 这一时段,  $PM_{2.5}/PM_{10}$  处于同一水平, 03:00 以后降水在清除颗粒污染物的同时, 也降低了  $PM_{2.5}$  在  $PM_{10}$  中的占比。特别是在 08:00—18:00 这一时段, 降水发生时  $PM_{2.5}/PM_{10} < 0.6$ , 即大气颗粒物的主要来源是道路和建筑扬尘; 同时段非降水条件下

$PM_{2.5}/PM_{10} > 0.65$ , 此时  $NH_4^+$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$  和二次有机物是城市大气颗粒物的主要成分<sup>[18]</sup>。两种降水条件下,  $PM_{2.5}/PM_{10}$  均在 14:00 左右达到白天的峰值, 由于午后大气对流活动比较活跃, 颗粒物浓度正处于下降过程,  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度也处于一天中最低值(图 4), 由此可见在无降水条件下, 午后对流活动对大粒径污染物( $PM_{2.5-10}$ )的沉降作用更明显。

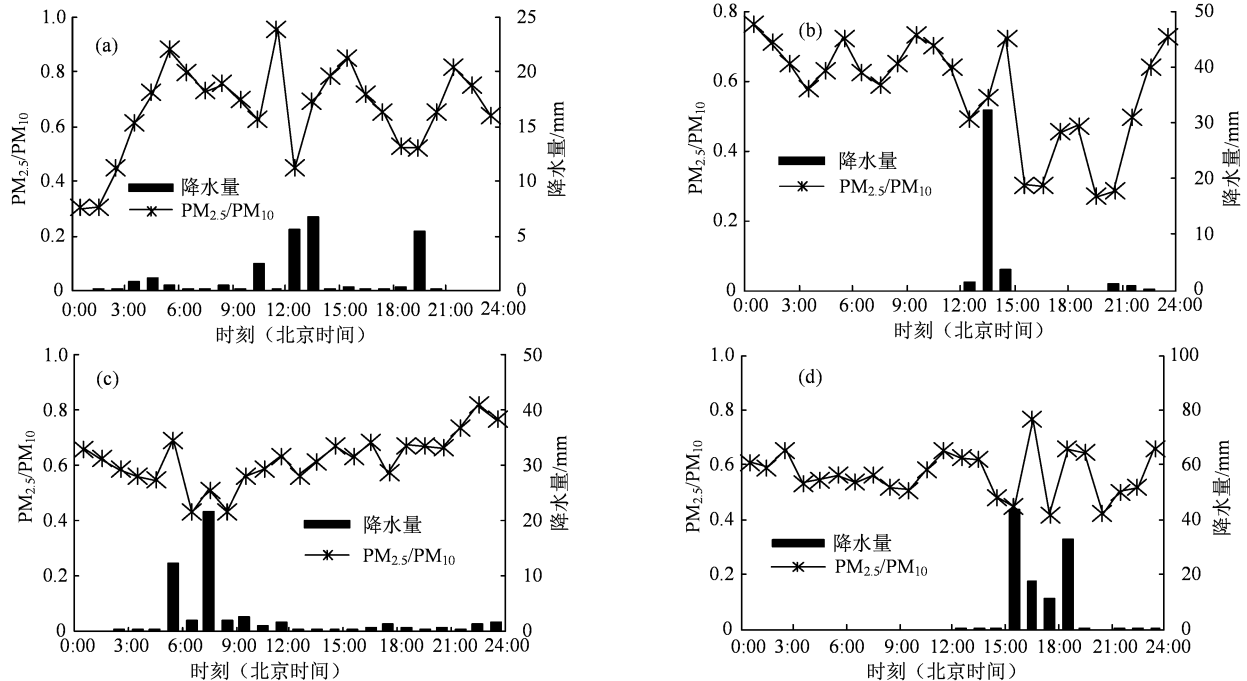


图 6 2017 年夏季降水日  $PM_{2.5}/PM_{10}$  日变化及逐小时降水量

Figure 6 Daily variation of  $PM_{2.5}/PM_{10}$  in 2017 summer rain days and hourly precipitation

## 2.4 案例分析

选取 2017 年 6 月 5 日、7 月 5 日、7 月 9 日和 8 月 19 日逐小时浓度数据, 结合安徽农业大学观测点对降水的观测, 分析大气中  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  浓度的变化, 认识降水过程对不同粒径大气污染物的影响。降水过程中  $PM_{2.5}/PM_{10}$  以及逐小时降水量如图 6 所示, 降水过程中  $PM_{2.5}/PM_{10}$  明显升高, 如 7 月 5 日降水集中发生在中午 12:00—14:00 (图 6 (b)), 在降水起止时刻  $PM_{2.5}/PM_{10}$  分别为 0.49、0.72, 表明降水过程中雨滴对  $PM_{2.5-10}$  的清除效果更明显, 降水结束 1 h 后  $PM_{2.5}/PM_{10}$  降低至 0.32, 说明降水结束后可能存在大粒径颗粒物生成过程可能, 这与胡敏等对降水过程前后颗粒物谱分布的结果相一致<sup>[17]</sup>。

结合 2.3.2 节对  $PM_{2.5}/PM_{10}$  的分析, 在 06:00—09:00 和 13:00—18:00 时段,  $PM_{2.5}$  在  $PM_{10}$  中的占比呈下降变化。上述时段  $PM_{2.5}/PM_{10}$  在降水活动下变化如图 6 (c)、(d) 所示, 7 月 9 日降水主要发生在上午, 其中 04:00—05:00 与 06:00—07:00 时段小时降水量较大分别为 12.2 和 21.83 mm, 在 05:00

与 07:00 时  $PM_{2.5}/PM_{10}$  相较前一个时刻均明显升高; 8 月 19 日降水发生在午后至傍晚, 逐小时降水量分别为 43.93、17.64、11.31 和 33.00 mm,  $PM_{2.5}/PM_{10}$  在 15:00—18:00 时段存在明显波动且比值明显较大, 与上文中降水对大粒径颗粒物清除效果更明显的结果一致, 在 17:00—18:00 时段  $PM_{2.5}/PM_{10}$  出现大幅度的回落, 该时段正值交通晚高峰, 即降水发生时人类活动对  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  浓度变化以及占比有一定影响。

## 3 讨论与结论

2015-2017 年合肥市夏季大气污染物浓度均存在波动。颗粒物污染物浓度有所下降, 各年夏季  $PM_{2.5}/PM_{10}$  分别为 0.58、0.61 和 0.60, 不同粒径颗粒物的占比发生变化; 气体污染物中  $SO_2$ 、CO 和  $NO_2$  浓度发生波动后, 与波动前浓度水平近似;  $O_3$  夏季浓度均值逐年升高, 2016 年和 2017 年相较前一年分别升高 2% 和 15%。

夏季大气污染浓度日变化特征呈单峰型 ( $SO_2$ 、

O<sub>3</sub>)和早晚双峰型(PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub>、CO、PM<sub>10</sub>)。SO<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>的日变化峰值分别出现在09:00和15:00, O<sub>3</sub>日变化波动较大(81.83±26.62) μg·m<sup>-3</sup>, SO<sub>2</sub>除峰值(11.80 μg·m<sup>-3</sup>)明显较大其他时段浓度维持同一水平(10.49±0.73) μg·m<sup>-3</sup>。PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub>、CO和PM<sub>10</sub>的两峰值均出现在08:00—09:00和21:00—22:00, 15:00左右浓度最小。

降水对NO<sub>2</sub>、CO和O<sub>3</sub>浓度日变化特征无明显影响, 仍呈双峰型和单峰型, SO<sub>2</sub>浓度明显降低。降水发生时NO<sub>2</sub>和CO浓度明显降低, 其中夜间NO<sub>2</sub>浓度约为同时刻无降水发生时的55%~60%, 降水发生时夜间最低浓度为20.53 μg·m<sup>-3</sup>, 明显低于无降水发生时浓度(27.98 μg·m<sup>-3</sup>); CO各个时刻浓度下降约20%; SO<sub>2</sub>浓度维持在9.66 μg·m<sup>-3</sup>, 且单峰型特征消失; 由于降水发生时段的不确定性, 颗粒污染物浓度在下降的同时, 其日变化曲线波动复杂; 降水发生时PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>>0.65, 相较同时段非降水条件下明显升高, 表明降水对大气污染物起到清除作用的同时, 也改变污染物的组成结构。

降水时段前后PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>变化明显, 降水结束时刻PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>相较降水开始前明显升高, 该值在降水结束后迅速下降表明雨后天气条件可能有利于大颗粒物的生成; 发生在交通高峰期的降水对PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>影响并不明显, 即人类活动是影响大气中颗粒污染物粒径分布结构的一个重要因素, 其中车辆尾气对不同粒径颗粒污染物的贡献有待继续研究。

## 参考文献:

[1] 任阵海, 万本太, 苏福庆, 等. 当前我国大气环境质量的几个特征[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1): 1-6.  
 [2] 贾梦唯, 赵天良, 张祥志, 等. 南京主要大气污染物季节变化及相关气象分析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(9): 2567-2577.  
 [3] 李小飞, 张明军, 王圣杰, 等. 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 1936-1943.  
 [4] RAMANATHAN V, CRUTZEN P J, KIEHL J T, et al.

Aerosols, climate, and the hydrological cycle[J]. Science, 2001, 294(5549): 2119-2124.  
 [5] 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.  
 [6] 李景鑫, 陈思宇, 王式功, 等. 2013—2014年我国大气污染物的时空分布特征及SO<sub>2</sub>质量浓度年代际变化[J]. 中国科技论文, 2017, 12(3): 336-345.  
 [7] 高歌. 1961—2005年中国霾日气候特征及变化分析[J]. 地理学报, 2008, 63(7): 761-768.  
 [8] 王淑兰, 张远航, 钟流举, 等. 珠江三角洲城市间空气污染的相互影响[J]. 中国环境科学, 2005, 25(2): 133-137.  
 [9] 高丽波, 王体健, 崔金梦, 等. 2016年夏季南京大气污染特征观测分析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(1): 1-12.  
 [10] 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.  
 [11] 陆雨婷, 姚梦园, 朱娴飞, 等. 合肥市建设扩张与生态格局时空演变特征分析[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(3): 492-500.  
 [12] 李莹莹, 黄成林. 快速城市化背景下上海绿色空间时空动态演变[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(1): 87-93.  
 [13] CHATE D M, MURUGAVEL P, ALI K, et al. Below-cloud rain scavenging of atmospheric aerosols for aerosol deposition models[J]. Atmos Res, 2011, 99(3/4): 528-536.  
 [14] GREENFIELD S M. Rain scavenging of radioactive particulate matter from the atmosphere[J]. J Meteor, 1957, 14(2): 115-125.  
 [15] 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.  
 [16] DENG T, WANG T, WANG S, et al. Impact of typhoon periphery on high ozone and high aerosol pollution in the Pearl River Delta region[J]. Sci Total Environ, 2019, 668: 617-630.  
 [17] 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.  
 [18] 赵辉, 郑有飞, 徐静馨, 等. 中国典型城市大气污染物浓度时空变化特征分析[J]. 地球与环境, 2016, 44(5): 549-556.  
 [19] 张璐瑶, 牛生杰, 王天舒, 等. 南京冬季晴天及雾-霾天气纳米气溶胶粒子谱日变化比较[J]. 中国环境科学, 2019, 39(7): 2699-2709.  
 [20] 陈武, 董发勤, 邓跃全, 等. 银川市城郊PM<sub>2.5</sub>质量浓度日变化规律与组成特性分析[J]. 矿物学报, 2012, 32(S1): 131-132.