

郑州市降水对大气污染物浓度的影响分析

王桂红¹, 邵振平^{2,3}

- (1. 周口市气象局, 周口 466000;
2. 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 郑州 450003;
3. 河南省人工影响天气中心, 郑州 450003)

摘要: 基于2017—2020年郑州市空气质量监测数据和同期地面气象观测资料, 采用数理统计方法, 分析了郑州市降水对空气质量和大气污染物浓度的影响。结果表明, 有降水时的空气质量等级为优和良的频率比无降水时的频率高, 且降水量级越大空气质量越好。除SO₂外, 郑州市其他大气污染物PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、O₃和CO在降水天气后浓度降低时次占比为42.97%~56.12%, 其中PM₁₀浓度降低最明显, CO最不明显。小时降水量越大, 污染物浓度降低值越小, PM_{2.5}和PM₁₀在降雨天气后浓度降低时次占比越大, 当小时降水量(R)>1 mm时, 浓度降低时次占比显著高于升高时次占比, 且粒径越大效果越好; SO₂没有明显变化规律; NO₂和CO变化不大。降水天气前大气污染物浓度越高, 降水天气后浓度降低值的范围越大; 同时浓度降低时次占比也越大(NO₂除外)。在小时降水量较大、大气污染物浓度较高时开展人工增雨作业, 可以有效改善空气质量, 特别是PM_{2.5}和PM₁₀浓度的降低最为显著。

关键词: 降水; 污染物浓度; 小时降水量; 郑州市

中图分类号: X513

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022070046

Analysis of the influence of precipitation on air pollutants' concentration in Zhengzhou

WANG Guihong¹, SHAO Zhenping^{2,3}

- (1. Zhoukou Meteorological Office, Zhoukou 466000, China; 2. Key Laboratory of Agro-Meteorological Safeguard Application Technique, China Meteorological Administration, Zhengzhou 450003, China; 3. The Weather Modification Center of Henan Province, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Based on the air quality monitoring data of Zhengzhou from 2017 to 2020 and the surface meteorological observation data of the same period, the influence of precipitation on air quality and atmospheric pollutants' concentration in Zhengzhou was analyzed by using a mathematical statistics method. The results showed that the frequency of excellent and good air quality grades was higher with precipitation than without precipitation. And the higher the precipitation grade was, the better the air quality was. Except for SO₂, the concentration of the other air pollutants PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, O₃, and CO in Zhengzhou decreased with a proportion of 42.97%~56.12% after precipitation, among which the concentration of PM₁₀ decreased most obviously, the reduction of CO concentration was least obvious. The greater the hourly rainfall was, the smaller the reduction value of pollutant concentration was, and the greater the proportion of PM_{2.5}, and PM₁₀ concentration reduction after the rainfall was, when the hourly rainfall (R) was > 1 mm, the proportion of hourly decreasing concentration was significantly higher than that of increasing concentration, and the larger particle size was, the better the effect was. SO₂ had no obvious change rule; NO₂ and CO didn't change much. The higher the concentration of air pollutants was before the precipitation, the larger the range of concentration reduction value was after the rainfall; at the same time, the greater the percentage of hourly decreasing concentration was (except for SO₂). When the hourly precipitation intensity was high and the concentration of air pollutants was high, artificial precipitation could effectively improve the air quality, especially for the reduction of PM_{2.5} and PM₁₀ concentration.

Keywords: precipitation; pollutant concentration; hourly precipitation; Zhengzhou

CLC number: X513

收稿日期: 2022-07-27

录用日期: 2022-08-25

基金项目: 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点实验室应用技术研究项目(KM201824); 河南省科技厅重大科技攻关项目(212102310423)

作者简介: 王桂红(1987—), 女, 硕士、高级工程师。研究方向: 人工影响天气技术。E-mail: 409208654@qq.com

引用格式: 王桂红, 邵振平. 郑州市降水对大气污染物浓度的影响分析[J]. 环境保护科学, 2023, 49(4): 127-133.

随着经济社会的迅速发展,工业化、交通运输化和城镇化等对能源的消耗显著增加,城市空气受到了不同程度的污染,大气中的气体污染物(如氮氧化物、硫化物和臭氧等)、固体颗粒物对人类的身体健康和日常生活产生了严重的影响^[1-2]。近年来,中国特别是京津冀、长三角和珠三角等重点区域^[3-5]的大气环境问题受到了广泛关注。研究表明,在污染源相对稳定的情况下,降水、温度、湿度和风速等气象要素对污染物的稀释、扩散、输送和转化等过程的影响占据了主要地位^[6-8]。发生降雨天气时,云内雨滴吸附和云下雨水冲刷作用对大气污染物浓度的影响最为直接,尤其是云下雨水冲刷作用可以有效降低大气污染物的浓度^[9-10]。降水天气对空气质量的改善程度与降水量级的大小、降水前大气污染状况也有一定的关系^[11]。人工增雨作业是一种人为干预大气降水的科技手段,它通过飞机、高炮和火箭等工具将催化剂携带到可能下雨或正在下雨的目标云中,从而影响局部大气的云物理过程,达到增加降雨量的目的,为农业抗旱、大气污染防治和改善生态环境提供了有力支撑。近年来,它逐渐成为城市大气污染防治的有效手段。作业条件、作业时机和作业部位的选取直接影响着最终的增雨效果^[12-14],因此,分析降水与大气污染物浓度变化的关系,可为采用人工增雨手段治理大气污染问题时作业时机的选择提供科学依据。

郑州市是河南省的省会,位于河南省中部偏北(112°42'~114°14'E, 34°16'~34°58'N),下辖 6 区 5 市 1 县,总面积 7 446 km²,总地势为西南高、东北低。属北温带大陆性季风气候,四季分明,多年平均气温 15.6 °C,多年平均降雨量 542.15 mm。地处京广线和陇海线交汇处,被人们称为“火车拉来的城市”,是国家重要的综合交通枢纽,同时也是国务院批复确定的中国中部地区重要的中心城市,经济比较发达、人口比较密集,空气质量重度和严重污染现象时有发生。李尉卿等^[15]从时空上对郑州市春节期间的大气污染物浓度变化特征进行研究,发现 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度受各种气象因素的直接影响。王桂红^[16]和任艳培等^[17]对郑州市空气质量变化规律及其与气象要素之间关系进行了研究,指出郑州市空气质量指数与降水量在全年均表现为明显的负相关关系。但是,目前很少有人研究郑州市降水对空气质量的影响规律,故探讨降水以及不同

等级降水是如何影响大气中各种污染物浓度的变化就显得非常有意义。本文深入分析郑州市降水与空气质量、大气污染物浓度的关系,可以为人工增雨改善空气质量时作业时机的选择提供理论参考,同时可以指导降水条件下的空气污染等级预报。

1 资料与方法

空气质量指数(air quality index,AQI)日数据和可吸入颗粒物(PM₁₀)、细颗粒物(PM_{2.5})、二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)、臭氧(O₃)和一氧化碳(CO)6种污染物小时数据来源于中国环境监测总站(<http://www.cnemc.cn/>),时间范围为 2017—2020 年。降水日数据和小时数据分别来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn>)和郑州市地面气象观测站,时间范围为 2017—2020 年。

根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行):HJ633—2012》^[18],AQI 是一种定量描述空气质量实际情况的无量纲指数,数值越大,表示空气污染越严重,对人体健康的影响也越大。文献 [18] 根据 AQI 大小将我国城市空气质量划分为 6 个等级: AQI 为 0~50,空气质量状况属于优; AQI 为 51~100,空气质量状况属于良; AQI 为 101~150,空气质量状况属于轻度污染; AQI 为 151~200,空气质量状况属于中度污染; AQI 为 201~300,空气质量状况属于重度污染; AQI>300,空气质量状况属于严重污染。

气象学上,把降雨和降雪都称作降水。一般按 24 小时降水量(即日降水量)把降水分为 4 个主要等级。小雨(雪)、中雨(雪)、大雨(雪)和暴雨(雪)对应的日降水量标准分别为 0.1~9.9 mm(0.1~2.4 mm)、10.0~24.9 mm(2.5~4.9 mm)、25.0~49.9 mm(5.0~9.9 mm)和>50 mm(>10 mm)。

2 结果与分析

2.1 降水对空气质量的整体影响

郑州市 2017—2020 年逐日 AQI 值,除去缺测值,共 1 377 d,其中降水日数为 309 d,无降水日数 1 068 d。有无降水时不同空气质量等级出现频率,见图 1。

图 1 可知,有降水时,各种空气质量等级出现的日数占有降水日数的百分比:优 17.81%、良 59.86%、轻度污染 13.92%、中度污染 4.85%、重度

污染 3.24% 和严重污染 0.32%；无降水时，各种空气质量等级出现的日数占无降水日数的百分比：优 1.77%、良 48.51%、轻度污染 34.08%、中度污染 9.08%、重度污染 5.62% 和严重污染 0.94%。有降水时空气质量为优和良的日数出现频率远远高于无降水时，而有降水时空气质量为轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染的频率均小于无降水时。由此可知，降水对郑州市大气污染状况改善十分有利。

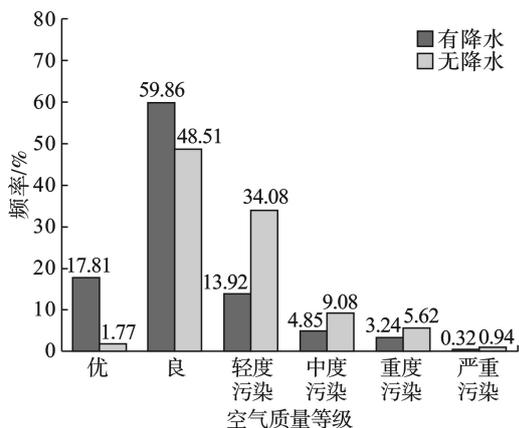


图 1 有无降水时不同空气质量等级出现频率
Fig. 1 Frequency of different air quality classes with or without precipitation

为了研究降水量对空气质量的影响，对不同等级的空气质量日数在不同降水量级时出现的频率进行了计算，见表 1。在有降水的 309 d 中，小雨(雪)有 236 d，中雨(雪)有 45 d，大雨(雪)有 20 d，暴雨(雪)有 8 d。小雨(雪)时，6 个等级的空气质量日数均有出现，但优和良占一半以上，总占比为 74.6%。中雨(雪)时未出现严重污染天气，且质量为优和良的日数出现频率高达 84.4%。大雨(雪)时空气质量只有优、良和轻度污染。暴雨(雪)时空气质量全为优和良。整体上看，污染等级天气出现的频率随着降水量级的增大而减小，说明降水量级越大，空气质量越好。

2.2 降水对大气污染物浓度的影响

2.2.1 降水后大气污染物浓度的总体变化情况 为了更好地研究降水对各种污染物浓度的影响，对降水时次后各种污染物浓度变化情况进行了分析，见表 2。

降水时次后，郑州市 PM₁₀ 和 O₃ 的浓度降低最为显著，降低时次占比超过一半，其中 PM₁₀ 浓度降低时次占比高达 56.12%。降水天气后，PM_{2.5}、NO₂

和 CO 这 3 种污染物浓度降低时次较高，所占比例范围为 42.97%~46.43%。SO₂ 浓度降低时次占比只有 26.09%，主要是由于浓度不变时次较高造成的，不变时次高达 61.41%。除 SO₂ 外，大气污染物在降水天气后浓度不变时次占比为 5.95%~15.42%。

表 1 不同降水量级下各种空气质量等级出现频率
Table 1 Frequency of various air quality classes under different precipitation levels

降水量级	空气质量等级出现频率/%					
	优	良	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染
小雨(雪)	12.7	61.9	16.1	5.5	3.4	0.4
中雨(雪)	33.3	51.1	8.9	4.4	2.2	0
大雨(雪)	35.0	60.0	5.0	0	0	0
暴雨(雪)	37.5	62.5	0	0	0	0

表 2 降水时次后大气污染物浓度变化占比
Table 2 Proportion of atmospheric pollutant concentration changes after precipitation

污染物	变化趋势占比/%		
	升高时次	不变时次	降低时次
PM _{2.5}	38.15	15.42	46.43
PM ₁₀	37.93	5.95	56.12
SO ₂	12.50	61.41	26.09
NO ₂	42.80	12.07	45.13
O ₃	37.66	8.17	54.17
CO	47.40	9.63	42.97

2.2.2 不同强度降水对大气污染物浓度的影响 降水强度是指单位时间或某一时段的降水量，能够直接反映降水剧烈程度的大小。由 2.1 降水对空气质量的整体影响研究表明，空气质量状况和降水量级大小有很大的关系。降水强度不同，对大气污染物的清除和冲刷作用不同，较大的风速对大气污染物也有着比较明显的扩散输送作用，且强降水和大风速常常相伴存在。

对降水时次后，6 种大气污染物浓度的变化规律进行分析，见图 2。

小时降水量越大，在降水天气后大气污染物的浓度变化值越小，这是因为强降水之前往往已经有持续的弱降水，大气中的污染物经过一段时间的雨水冲刷，已经降到比较低的水平，想要进一步下降就相对比较困难。对不同强度降水对污染物浓度的影响进一步分析表明，见表 3。

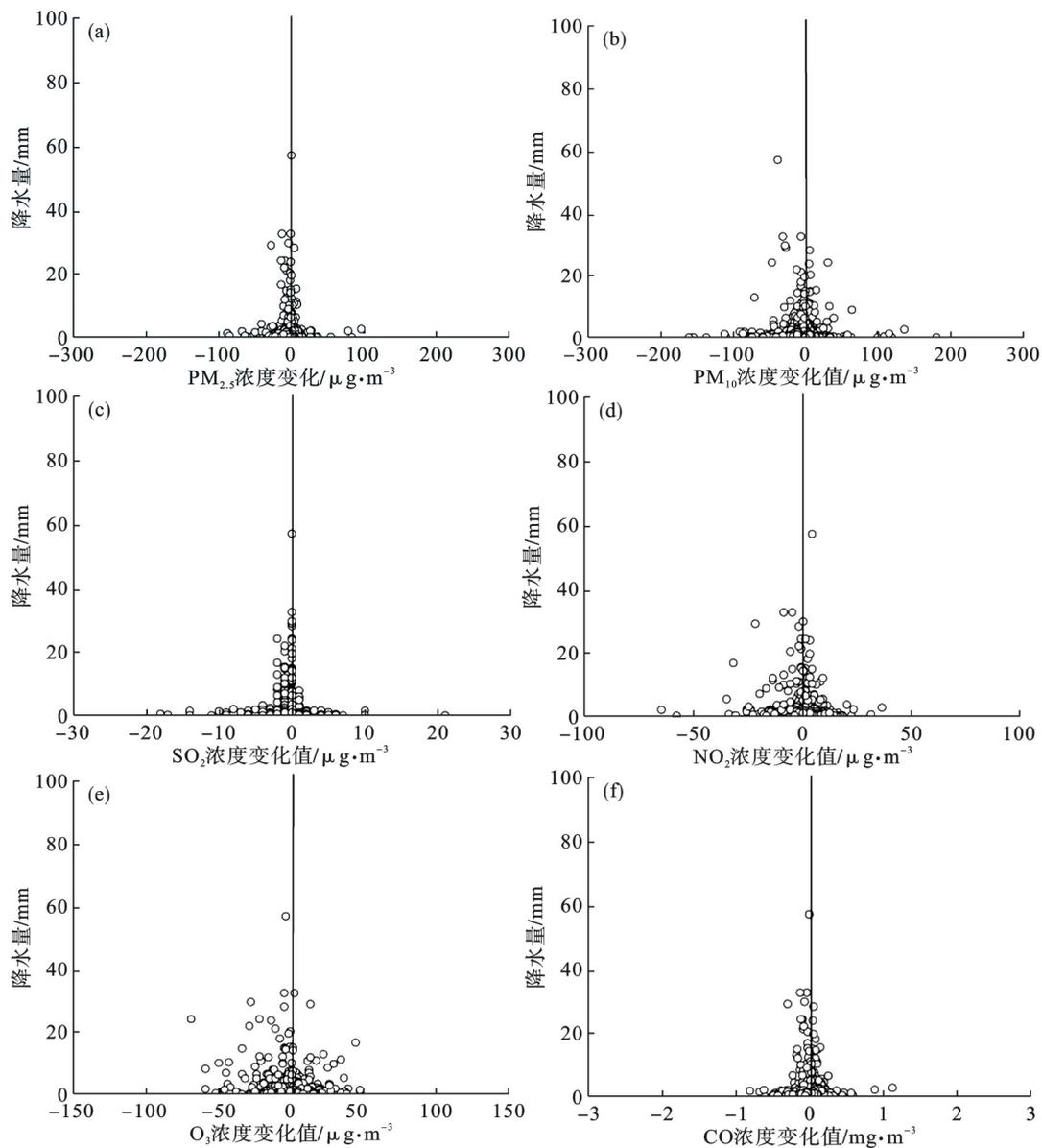


图 2 降水时次后大气污染物 PM_{2.5}(a)、PM₁₀(b)、SO₂(c)、NO₂(d)、O₃(e) 和 CO(f) 浓度变化

Fig. 2 Atmospheric pollutant of PM_{2.5}(a)、PM₁₀(b)、SO₂(c)、NO₂(d)、O₃(e) and CO(f) concentration changes after precipitation

在降水天气后, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度降低时次占比随着小时降水量的增加而增加, 同时浓度升高时次占比减小。在降水天气后, SO₂ 浓度降低时次占比随降水量等级的增加而稍微增大, 例外的是, 当小时降水量 (R) > 5 mm 时反而减小显著。NO₂ 和 CO 降水天气后浓度升高时次、不变时次和降低时次随降水量等级变化不大。O₃ 在 $R \leq 5$ mm 时, 降水天气后浓度降低时次随着小时降水量等级升高略有减少, 而当 $R > 5$ mm 时浓度降低时次增加比较明显。在各个不同等级雨强中, 颗粒物 PM_{2.5}、PM₁₀ 超过 40% 的降水时次后浓度降低, 尤其是当 $R > 1$ mm 时, 占比达到一半以上, 且 PM₁₀ 比 PM_{2.5}

降低更为明显。可见在 6 种大气污染物中, 较强降水对颗粒物的清除作用最明显, 这种现象随粒径增大而更加明显。在各个降水量级中, 降水天气后 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、O₃ 和 CO 浓度不变时次占比均 < 20%; 而 SO₂ 比较特殊, 各个降水量级中, 降水天气后浓度不变时次占比都 > 60%, 相对较大。

2.2.3 降水对不同浓度大气污染物的影响 降水天气后降水对各种污染物浓度变化的影响会随着大气污染物初始浓度的不同呈现出一定的规律性。根据污染物浓度的大小, 将 6 种大气污染物划分为 6 个等级^[19], 见表 4, 分析了降水天气后不同等级的大气污染物浓度变化情况。

表3 不同降水强度降水时次后大气污染物浓度变化占比
Table 3 The proportion of atmospheric pollutant concentration change after different rainfall intensity

污染物	变化趋势占比/%	0 mm<R≤1 mm	1 mm<R≤5 mm	R>5 mm
PM _{2.5}	升高时次	42.36	28.79	21.79
	不变时次	14.90	17.58	19.23
	降低时次	42.74	53.63	58.98
PM ₁₀	升高时次	40.46	31.87	30.77
	不变时次	5.78	6.81	3.85
	降低时次	53.76	61.32	65.38
SO ₂	升高时次	14.83	7.47	17.94
	不变时次	60.70	65.27	67.95
	降低时次	25.47	27.26	14.11
NO ₂	升高时次	43.42	40.88	43.59
	不变时次	11.86	13.19	8.97
	降低时次	44.72	45.93	47.44
O ₃	升高时次	37.34	40.44	26.92
	不变时次	8.97	6.15	6.41
	降低时次	53.69	53.41	66.67
CO	升高时次	47.76	46.81	44.87
	不变时次	9.81	8.79	11.54
	降低时次	42.43	44.40	43.59

注：R代表小时降水量。

表4 大气污染物浓度分级
Table 4 Concentration classification of air pollutants

污染物浓度	一级	二级	三级	四级	五级	六级
PM _{2.5}	0<c≤35	35<c≤75	75<c≤115	115<c≤150	150<c≤250	c>250
PM ₁₀	0<c≤50	50<c≤150	150<c≤250	250<c≤350	350<c≤420	c>420
SO ₂	0<c≤5	5<c≤10	10<c≤25	25<c≤50	50<c≤100	c>100
NO ₂	0<c≤5	5<c≤10	10<c≤20	20<c≤50	50<c≤100	c>100
O ₃	0<c≤20	20<c≤50	50<c≤100	100<c≤150	150<c≤200	c>200
CO	0<c≤0.3	0.3<c≤0.6	0.6<c≤1	1<c≤2	2<c≤5	c>5

注：c代表浓度，除CO的浓度单位为 mg·m⁻³外，其余大气污染物的浓度单位均为 μg·m⁻³。

研究表明，降水天气前大气污染物 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃ 和 CO 的初始浓度越高，降雨天气后浓度降低值的范围越大，而增加值的范围越小，见图3。

同时浓度降低时次占比也越大(NO₂除外)，见表5。

降水天气前大气污染物浓度越高，PM₁₀在降水天气后浓度升高时次占比越少，而PM_{2.5}和O₃浓度升高时次占比无明显变化规律，这可能是由于降水天气后这两种污染物浓度不变时次占比无

明显变化规律的缘故。降水天气后，不同初始污染物等级中，NO₂浓度升高、不变、降低时次占比无显著变化规律。降水天气后SO₂和CO浓度升高时次和降低时次占比均随着降雨天气前大气污染物浓度的升高而增加，主要是由于降水天气后浓度不变时次占比降低的缘故。SO₂在浓度较低的第一级中，降水天气后浓度不变时次占比比较大，高达82.10%，这种现象有可能是因为SO₂浓度值较低，而观测浓度不够精确，从而对SO₂浓度的变化反应不太敏感。

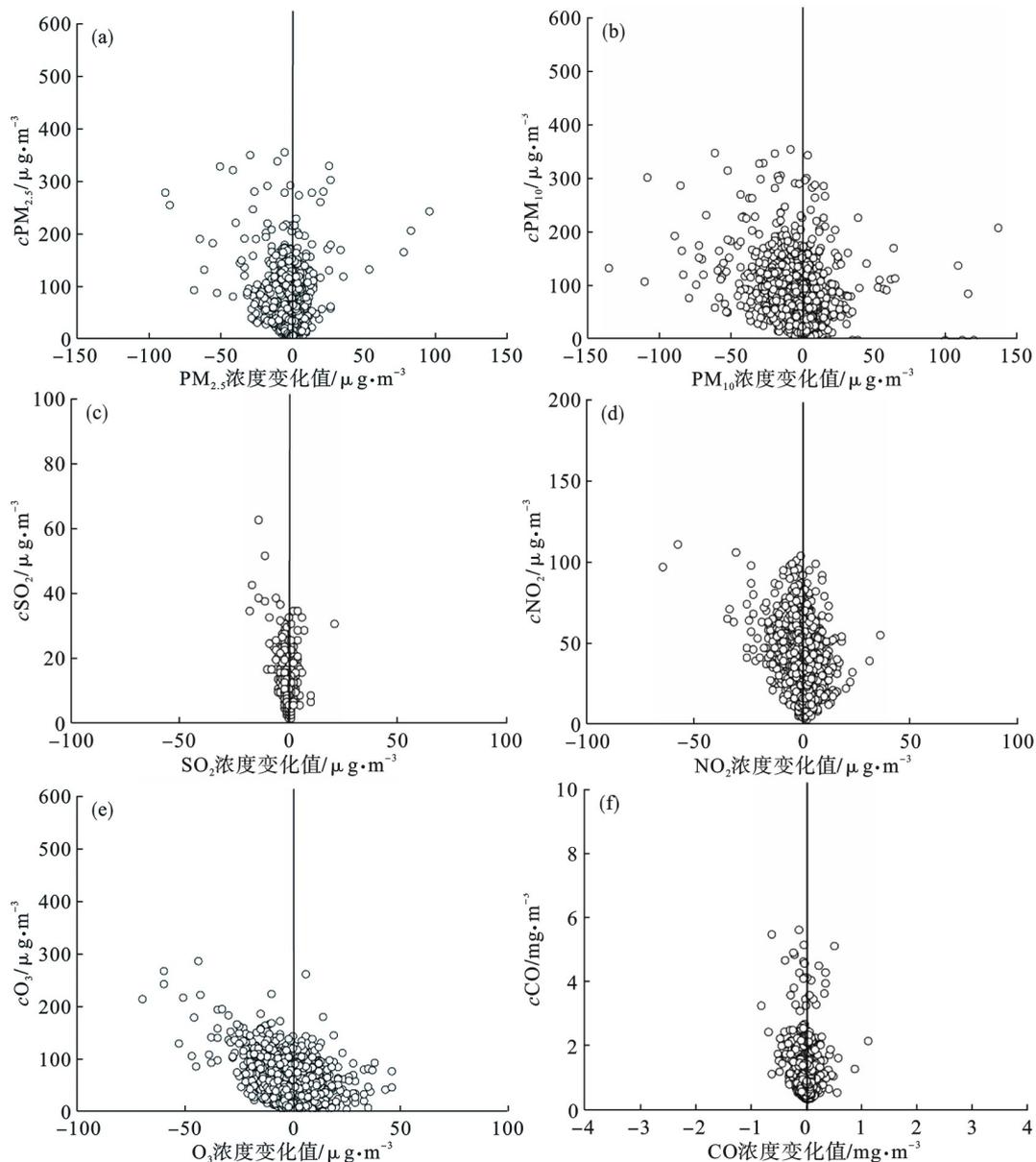


图 3 降水时次后大气污染物 $PM_{2.5}$ (a)、 PM_{10} (b)、 SO_2 (c)、 NO_2 (d)、 O_3 (e) 和 CO(f) 浓度变化值随初始浓度的分布
Fig.3 Distribution of atmospheric pollutant of $PM_{2.5}$ (a)、 PM_{10} (b)、 SO_2 (c)、 NO_2 (d)、 O_3 (e) 和 CO(f) concentration change value after precipitation time with initial concentration

表 5 不同等级污染物降水时次后大气污染物的浓度变化占比

Table 5 The proportion of atmospheric pollutant concentration change after rainfall of different pollutant levels

污染物	变化趋势占比	一级	二级	三级	四级	五级	六级
$PM_{2.5}$	升高时次占比	37.05	42.04	38.38	43.33	36.75	33.33
	不变时次占比	19.94	11.11	10.51	1.67	5.88	0
	降低时次占比	43.01	46.85	51.11	55.00	57.37	66.67
PM_{10}	升高时次占比	43.13	33.38	33.33	27.62	0	0
	不变时次占比	7.40	3.02	0	2.86	0	0
	降低时次占比	49.46	63.60	66.67	69.52	100	0
SO_2	升高时次占比	7.97	14.33	16.31	28.12	0	0
	不变时次占比	82.10	59.39	31.32	6.25	0	0
	降低时次占比	9.93	26.29	52.37	65.63	100	0

%

续表 5

污染物	变化趋势占比	一级	二级	三级	四级	五级	六级
NO ₂	升高时次占比	75.00	35.29	29.04	45.62	48.22	66.67
	不变时次占比	25.00	8.82	20.66	10.91	7.44	0
	降低时次占比	0	55.88	50.30	43.47	44.34	33.33
O ₃	升高时次占比	32.97	36.09	41.4	37.91	30.77	25.00
	不变时次占比	19.23	7.4	4.84	1.96	0	0
	降低时次占比	47.8	56.51	53.76	60.13	69.23	75.00
CO	升高时次占比	6.04	11.96	25.14	36.00	0	0
	不变时次占比	78.19	59.39	33.24	8.00	0	0
	降低时次占比	15.17	28.65	41.62	56.00	100	0

3 结论与建议

(1)有降水时空气质量等级为优和良的频率比无降水时的频率高,而无降水时其他污染等级的空气质量频率均大于有降水时的,可见降水有利于优良等级的空气质量出现,且降水量级越大空气质量越好。

(2)除 SO₂ 外,郑州市其他 5 种大气污染物在降雨天气后浓度降低时次占比为 42.97%~56.12%,且降雨天气后 PM₁₀ 浓度降低时次占比最大,CO 浓度降低时次占比最小。SO₂ 浓度不变时次占比最高。

(3)小时降水量越大,在降水时次后大气污染物浓度的变化量越小,其中颗粒物 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度降低时次占比越大,浓度升高时次占比越小,当小时降水量 (R)>1 mm 时,浓度降低时次占比显著高于升高时次占比,说明雨量较大时降水可以明显降低颗粒物的浓度,且粒径越大效果越好;SO₂ 由于不变时次占比较高,没有明显变化规律。在各个等级降水中,污染物 NO₂ 和 CO 在降雨天气后浓度升高时次、不变时次和降低时次占比变化不大。所以,在小时降雨量较大时开展人工增雨作业可以有效降低颗粒物 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的浓度。

(4)降水天气前大气污染物 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃ 和 CO 的初始浓度越高,降雨天气后浓度降低值的范围越大,而增加值的范围越小;同时浓度降低时次占比也越大(NO₂ 除外)。可见,在大气污染物浓度较高时开展人工增雨作业,对于改善空气质量效果比较明显。

参考文献

[1] 陈文花. 城市尺度环境空气质量评价中 AQI 指数的确定[J]. 海峡科学, 2013(12): 20-21.

[2] 蒋燕,陈波,鲁绍伟,等. 北京城市森林 PM_{2.5} 质量浓度特征及影响因素分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(3): 447-457.

[3] 周兆媛,张时煌,高庆先,等. 京津冀地区气象要素对空气质量的影响及未来变化趋势分析[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 191-199.

[4] 李思其,杜海波,吴正方,等. 京津冀鲁豫地区空气质量变化特征及其气象驱动因素研究[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(12): 1431-1454.

[5] 王媛林,王哲,陈学舜,等. 珠三角秋季典型气象条件对空气污染过程的影响分析[J]. 环境科学学报, 2017, 37(9): 3229-3239.

[6] 白永清,祁海霞,赵天良,等. 湖北 2015 年冬季 PM_{2.5} 重污染过程的气象输送条件及日变化特征分析[J]. 气象学报, 2018, 76(5): 803-815.

[7] 周贺玲,李雪瑶,刘玉莲,等. 河北廊坊降水对 PM_{2.5} 质量浓度的湿清除作用[J]. 环境保护科学, 2020, 46(2): 70-75.

[8] 于彩霞,邓学良. 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.

[9] 张丹梅. 人工增雨对大气颗粒污染物浓度的消减作用研究[J]. 环境科学与管理, 2021, 46(1): 43-47.

[10] 廖代强,向波,刘永明. 重庆市主城区气象要素与空气质量相关性研究[J]. 环境影响评价, 2020, 42(1): 75-80.

[11] 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.

[12] 白婷,黄毅梅,樊奇. 河南一次降水天气过程人工增雨作业条件综合分析[J]. 气象, 2020, 46(12): 1633-1640.

[13] 田万顺,刘艳华. 河南 3 次降水过程的人工增雨条件分析[J]. 气象与环境科学, 2011, 34(1): 5-13.

[14] 马秀玲. 一次春季人工增雨作业条件分析[J]. 内蒙古气象, 2018(6): 40-43.

[15] 李尉卿,杜光俊,王梦. 郑州市 2012-2014 年春节期间大气污染物浓度时空变化特征研究[J]. 气象与环境科学, 2015, 38(4): 12-21.

[16] 王桂红. 郑州市空气质量变化特征及其与气象要素的关系[J]. 河南科学, 2021, 39(9): 1497-1503.

[17] 任艳培,张洪伟,谢国红. 郑州市空气质量变化特征研究[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2021, 49(2): 54-61.

[18] 环境保护部. 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行): HJ633—2012[S]. 北京: 中国环境出版社, 2012.

[19] 安林昌,张恒德,李凯飞. 降雨天气对大气污染物浓度的影响分析[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(3): 58-70.