

岳岩裕,沈龙娇,周悦,等,2022. 武汉市军运会期间空气质量特征及气象条件分析[J]. 气象,48(1):96-106. Yue Y Y, Shen L J, Zhou Y, et al, 2022. Analysis on the characteristics of air quality and meteorological conditions during the 7th CISM military world games[J]. Meteor Mon, 48(1):96-106(in Chinese).

武汉市军运会期间空气质量特征及气象条件分析^{*}

岳岩裕^{1,2} 沈龙娇³ 周悦² 柳草⁴ 张灵¹ 范进进⁵

1 武汉区域气候中心,武汉 430074

2 中国气象局武汉暴雨研究所,武汉 430205

3 武汉市环境监测中心站,武汉 430015

4 武汉中心气象台,武汉 430074

5 湖北省公众气象服务中心,武汉 430074

提 要: 利用 2019 年 10 月 1—30 日湖北省及邻近地区的空气质量、气象要素监测数据和再分析资料,分析了第七届世界军人运动会(以下简称军运会)期间和前后时段空气质量变化特征及气象条件的影响。军运会管控期Ⅱ(17—28 日)与过去五年(2014—2018 年)同期相比颗粒物浓度下降最明显,与长沙等其他城市相比也是最低,相近时间段或相似背景下未采取管控措施,PM_{2.5} 浓度上升速度快,管控措施对颗粒物削峰降速作用明显。管控期 O₃ 和 NO₂ 为首要污染物,O₃ 浓度与过去五年相比升高,但管控仍起了一定作用,武汉城市圈 O₃ 超标背景下武汉未达轻度污染级别;NO₂ 浓度同比下降,环比其他城市偏高。与管控期Ⅰ(13—16 日)相比,管控期Ⅱ措施更严格,但降水偏少、风速偏小,气象条件整体不利于污染物浓度降低,因此浓度有所上升,其中 17—21 日以反气旋环流为主,天气形势静稳,光化学反应强烈,O₃ 和 NO₂ 浓度上升明显。基于气象条件评估指数(EMI)分析发现,2019 年 10 月与 2013—2017 年相比,EMI 为正值,说明 2019 年的气象条件不利于 PM_{2.5} 浓度的降低,PM_{2.5} 浓度下降主要是由减排造成的。

关键词: 空气质量,气象条件,气象贡献

中图分类号: X16,P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.061501

Analysis on the Characteristics of Air Quality and Meteorological Conditions During the 7th CISM Military World Games

YUE Yanyu^{1,2} SHEN Longjiao³ ZHOU Yue² LIU Cao⁴ ZHANG Ling¹ FAN Jinjin⁵

1 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074

2 Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

3 Wuhan Environmental Monitoring Center, Wuhan 430015

4 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

5 Hubei Public Meteorological Service Center, Wuhan 430074

Abstract: Based on the observation data of air quality, meteorological elements, and reanalysis data, the evolution characteristics of air quality in Hubei Province and its adjacent areas from 1 to 30 October 2019, the impacts of meteorological conditions on the air quality during the 7th CISM Military World Games and before and after of this time are analyzed. The concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀ in control period Ⅱ (from 17

^{*} 国家重点研发计划(2017YFC0212601)、国家自然科学基金项目(41830965、41875170)和湖北省气象局科技发展基金项目(2021Z05、2019Q06)共同资助

2020 年 12 月 22 日收稿; 2021 年 11 月 18 日收修定稿

第一作者:岳岩裕,主要从事雾和霾理化特性及灾害性天气研究. E-mail: yueyanyu123@163.com

通讯作者:周悦,主要从事重污染天气和电线积冰相关机理研究. E-mail: zhouyue8510@163.com

to 28 October) were lower than the average concentrations in past five years and in other surrounding cities. Control measures were effective in decreasing concentration and restraining ascending velocity. O_3 and NO_2 were the primary pollutants in control periods (I and II) (from 13 to 16 October, and 17 to 28 October). Compared with the past five years, the concentration of O_3 in Wuhan increased. However, under the background of excessive O_3 in other nearby cities, pollution in Wuhan did not reach the polluted level, which indicates the control still took some effects. Actually, the concentration of NO_2 was lower than normal years, but higher than that in other cities. Compared with control period I, precipitation was less and wind speed was small in control period II, thus the meteorological condition was not good for pollutant concentration to decrease. Anticyclonic circulation was dominant from 17 to 21 October, and sunlight and radiation was high with intense photochemical reaction, so concentrations of O_3 and NO_2 raised obviously. Based on evaluation on meteorological condition index (EMI), EMI was a positive value in 2019 compared with 2013–2017, which indicates that the meteorological conditions in 2019 were not conducive to the reduction of $PM_{2.5}$, so emission reduction did the most significant contribution to the decreased concentration.

Key words: air quality, meteorological condition, meteorological contribution

引言

2019年10月18—27日第七届世界军人运动会(以下简称军运会)在武汉举行,为保障比赛期间的空气质量,武汉市成立了军运会赛时环境空气质量保障指挥部,发布了大气环境质量管理临时性措施及应急措施,包括部分企业停产限产、工地停工、柴油货车限行、加强道路清洁等,以确保军运会期间武汉市的空气质量。

大型活动或赛事通常通过实施一系列的大气污染物临时管控减排措施,来提高期间空气质量的水平,近十几年多项大型活动或赛事期间的防治减排工作,为开展区域大气污染特征及大气污染控制效果研究提供了难得的实践机会(吴兑等,2012;陈敏等,2013;谢放尖等,2014;Huang et al, 2015)。为此,学者们开展了有针对性的研究,刘子锐等(2011)指出2008年北京奥运会期间排放减少和区域输送减弱导致颗粒物浓度显著降低。程念亮等(2016)分析2014年11月1—12日APEC会议期间北京市 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 的浓度比近五年平均浓度分别降低了45%、43%、64%和31%。Tang et al (2015)发现2014年北京APEC会议期间区域输送贡献比会前降低了36%,本地源排放也降低了48%。Wei et al(2016)发现在强逆温和高湿度的影响下,APEC会议结束后北京出现了污染物浓度的

爆发性增长。稳定的天气背景如小风、高湿和强逆温等易造成重污染(Lin et al, 2008; Chen et al, 2018; 陈镭等, 2020; 胡春梅等, 2020),受不利气象条件的影响2016年杭州G20会议期间颗粒物、 SO_2 和 O_3 浓度比管控前均有不同程度增长,但其增幅比周边城市小(赵军平等, 2017)。

军运会和2014年北京APEC会议均在秋季举办,两次会议期间的气象条件差异较大,且容易出现静稳天气,减排的效果会受到不利气象条件影响(Zhou et al, 2010; 王占山等, 2016; 张礁石等, 2016)。通过分析军运会期间武汉及其周边地区空气质量特征,定性和定量研究气象条件对武汉军运会期间空气质量变化的影响,并初步评估军运会期间管控措施对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的贡献,以期为今后华中地区大型活动空气质量保障提供建议和参考。

1 数据与方法

1.1 数据资料

空气质量数据来自生态环境部数据中心发布的全国不同城市(武汉、黄冈、孝感、襄阳、信阳、长沙,图1)2015—2019年逐日(01—24时)六要素($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 、 NO_2 、 SO_2 、CO)浓度和空气质量指数数据(<https://datacenter.mee.gov.cn/web-sjzx/queryIndex.vm>);武汉市10个国控站点(图1)

数据来自湖北省生态环境监测中心站。地面气象要素数据和高空填图来自湖北省气象局信息与技术保障中心综合气象信息共享平台(CIMISS),气象要素包括气温、气压、相对湿度、风速、日照等逐小时站点数据,并基于逐小时数据计算气象要素日均值。

PM_{2.5}气象条件评估指数(EMI)是表征 PM_{2.5}浓度变化中气象条件贡献的无量纲指标(国家气象中心和中国气象科学研究院,2019),用地面至 1500 m 高度气柱 PM_{2.5}平均浓度与参考浓度的比值表示,可以定量反映气象条件变化对浓度变化的贡献率,负值表示扩散条件较优,有降低 PM_{2.5}浓度效果,正值表示扩散条件较差,有增加 PM_{2.5}浓度效果。EMI 通过雾-霾数值预报业务系统 CMA-CUACE-HAZE 模式计算得到,计算覆盖全国,水平分辨率为 15 km,计算时使用 2015 年排放源,基于格点数据插值得到武汉市站点数据。

1.2 数据处理

污染物浓度变率(RATE₀)、气象条件变率(RATE_w)和排放变化率(RATE_s)的计算公式如下:

$$RATE_0 = \frac{C_1 - C_0}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$RATE_w = \frac{I_1 - I_0}{I_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$RATE_s = \left(\frac{C_1/C_0}{I_1/I_0} - 1.0 \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: C₁ 为时段 1 污染物浓度, C₀ 为时段 0 污染物浓度; I₁ 为时段 1 的 EMI, I₀ 为时段 0 的 EMI。

1.3 研究时间

军运会举办时间为 2019 年 10 月 18—27 日,根据管控时间将武汉市军运会分为三个阶段:管控前(10 月 1—12 日)、管控期(13—28 日)和管控后(29—31 日),其中 17—28 日为应急管控期,因此分析中将管控期分为管控期 I(13—16 日)和管控期 II(17—28 日)。10 月 13 日武汉市政府通过了大气环境质量管理临时性措施的决定,17 日武汉市启动了该措施,按照“一企一策”的要求,针对全市的重点企业采取全面的应急措施,同时对长江武汉段和汉江武汉段的货船等进行了管控。加强对重点区域机动车的疏导,限行全市范围部分公交车,鼓励市民采取绿色出行方式,全市暂停工地施工,并对道路进行

了洒水降尘作业。

2 结果分析

2.1 天气形势分析

由 2019 年 10 月 13—28 日 500 hPa 平均高度距平场可见(图 2),东亚大陆上的高空槽脊系统,分别位于贝加尔湖和鄂霍次克海至日本群岛,高空槽和高空脊系统均较常年同期略强,中国大陆北部处于高空槽后,南部为副热带高压控制。西太平洋副热带高压被东海上空的气旋分隔为两个单体,其中一个单体位于东亚大陆 588 dagpm 线,呈闭合状态,中心强度相对较强,位置异常偏西,水汽输送相对较西。在与之对应的低空 850 hPa 风场上,以南海为中心的反气旋较为明显,湖北省处于反气旋的北部,降水呈现出西多东少的特征。武汉市降水量也较常年同期偏少 6 成多。

10 月 5—16 日湖北省 500 hPa 高度以平直气流为主,多波动东移,配合低空弱切变线,湖北大部包括武汉市以阴雨天气为主。17—21 日高空以偏北气流为主,天气晴好,气温回升,地面受均压场控制,风力较弱。21—27 日,500 hPa 再次转为平直气流,云系明显增加,其中 22 日受切变线影响,湖北大部出现小到中雨,其他时间湖北中东部包括武汉市以阴天间多云或弱降水为主。28 日开始高空再次转为偏北气流,湖北大部天气多云转晴。

2.2 军运会空气质量时间分布特征

军运会不同管控阶段的污染物浓度处于低值(表 1),AQI 维持轻度污染以下,与往年相比显著偏低,四个阶段 AQI 数值为管控后>管控前>管控期 II>管控期 I;PM_{2.5}、PM₁₀和 NO₂浓度值为管控后>管控期 II>管控前>管控期 I;SO₂和 CO 浓度在管控期最低;O₃浓度为管控前>管控期 II>管控后>管控期 I。1—12 日未采取管控措施前武汉的 PM_{2.5}和 PM₁₀质量浓度平均值分别为 28.8 μg·m⁻³、47.2 μg·m⁻³,与 2014—2018 年五年同期相比分别偏低 40%和 45%,这一阶段空气质量整体较好,明显优于往年同期。进入管控期后,在管控期 I(13—16 日)颗粒物和反应性气体浓度比管控前降

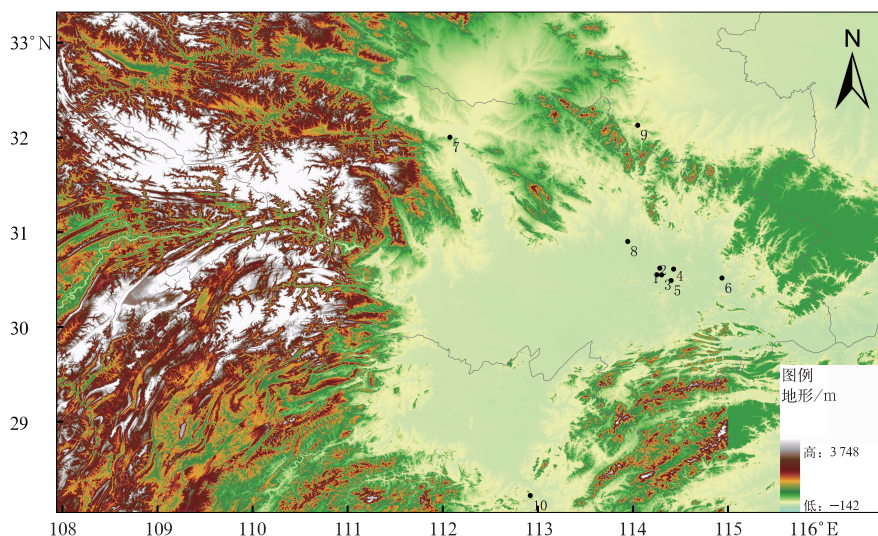


图1 武汉市空气质量监测站及周边城市地理位置

(1:汉口华桥,2:汉阳月湖,3:武昌紫阳,4:青山钢花,5:民族大道,
6:黄冈,7:襄阳,8:孝感,9:信阳,10:长沙;1~5为武汉市国控站点)

Fig. 1 The locations of air quality monitoring sites in Wuhan and the surrounding cities

(1: Hankouhuaqiao, 2: Hanyangyuehu, 3: Wuchangziyang, 4: Qingshanganghua, 5: Minzudadao,
6: Huanggang, 7: Xiangyang, 8: Xiaogan, 9: Xinyang, 10: Changsha; 1~5 represent state-controlled stations of Wuhan)

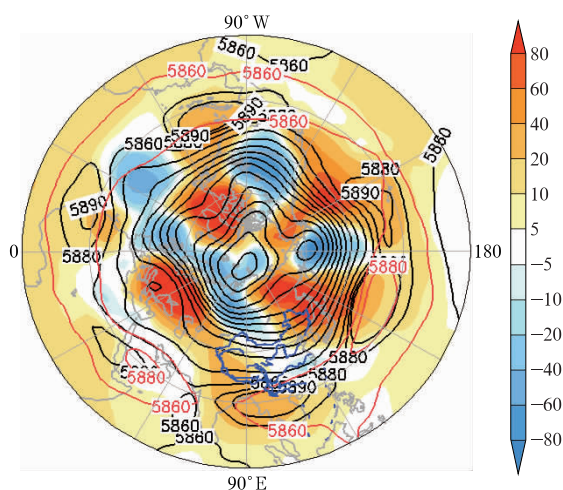


图2 2019年10月13—28日军运会管控期间
500 hPa高度场及其距平

(填色:距平场,等值线:平均场,单位:gpm)

Fig. 2 Average height field and its anomaly at 500 hPa

(colored: anomaly, contour: average, unit: gpm)

during control period of the 7th CISM Military
World Games in 13—28 October 2019

低,但管控期Ⅱ(17—28日)大气污染物浓度反而有所上升, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 浓度比管控前分别上升了15%、13%和40%,其中 NO_2 上升幅度最大;但与五年同期相比颗粒物浓度仍下降显著(偏低约48%), NO_2 偏低21%, O_3 偏高13%。管控后(29—31日),

除 O_3 外,其他污染物的浓度均有所上升,与管控期Ⅱ相比 PM_{10} 和 NO_2 分别上升了136%和67%。随着减排措施的取消,大气污染物浓度呈现反弹上升的趋势,与赵辉等(2015)研究结果相似。

在2014—2018年五年同期,10月17—28日 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、CO浓度平均值均为四个时段内最高,说明这一时段的天气形势易于污染天气的形成,挑选2017—2019年10月相近时间段的5次污染过程(过程1:2019年10月16—23日,过程2:2018年10月1—10日,过程3:2018年10月20—26日,过程4:2017年10月5—11日,过程5:2017年10月19—25日),对比分析采取管控措施对污染过程的影响(表2),可以看出过程1~过程3 $PM_{2.5}$ 浓度、 O_3 浓度和AQI的上升速度比较接近,过程1中 $PM_{2.5}$ 浓度上升速度略慢,其峰值浓度低,且 O_3 初始浓度偏高,在相似的上升速度下,峰值浓度更高。过程2的 O_3 初始浓度最高,峰值浓度也高,达到轻度污染。2017年的两次过程(过程4和过程5)初始浓度均较低,但是上升速度快,AQI也达到轻度污染。军运会期间(过程1)的 $PM_{2.5}$ 浓度和AQI上升速度最慢, O_3 浓度上升速度仅比过程2略快,说明军运会管控措施可以降低污染物浓度上升的速度,对颗粒物作用最为显著,但对 O_3 作用略小。

同时,值得注意的是 O_3 和 NO_2 浓度在管控期

II 均出现高于其他年份或明显升高的特征,管控期 O_3 和 NO_2 为首要污染物的时段占总日数的 83%,

这表明军运会管控措施下仍然存在着部分时段 O_3 和 NO_2 浓度增加的问题。

表 1 2019 年军运会不同管控阶段的 AQI、六要素浓度及同期对比

Table 1 AQI, pollutant concentrations and contemporary comparison in different control periods of the 7th CISM Military World Games in 2019

时段	AQI	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	CO	NO ₂	O ₃
		$/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	$/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	$/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	$/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	$/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	$/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$
2019 年	管控前(1—12 日)	71.9	28.8	47.2	9.5	0.88	33.2
	管控期 I (13—16 日)	46.8	25.0	43.0	6.5	0.78	24.7
	管控期 II (17—28 日)	65.1	33.0	53.2	8.3	0.83	46.6
	管控后(29—31 日)	94.3	51.0	125.3	11.3	1.10	77.7
2014— 2018 年	10 月 1—12 日	80.4	48.2	86.1	15.9	1.03	46.5
	10 月 13—16 日	80.8	57.1	98.2	17.7	1.03	57.8
	10 月 17—28 日	92.6	62.9	103.5	16.9	1.17	59.2
	10 月 29—31 日	77.3	45.9	70.9	12.5	0.95	51.0

表 2 不同过程 PM_{2.5}、O₃ 和 AQI 浓度及其变化幅度

Table 2 Concentrations and variation ranges of PM_{2.5} and O₃ and AQI in different processes

过程	时段	PM _{2.5}			O ₃			AQI		
		起始浓度 $/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	峰值浓度 $/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	上升速度 $/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1})$	起始浓度 $/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	峰值浓度 $/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	上升速度 $/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1})$	起始 值	峰 值	上升速 度/ d^{-1}
过程 1	2019 年 10 月 16—23 日	21	47	5.2	65	150	17.0	33	95	12.4
过程 2	2018 年 10 月 1—10 日	15	69	7.7	112	191	15.8	60	129	13.8
过程 3	2018 年 10 月 20—26 日	34	65	7.7	41	112	17.7	57	95	12.7
过程 4	2017 年 10 月 5—11 日	9	66	14.3	27	161	44.7	38	100	20.7
过程 5	2017 年 10 月 19—25 日	20	102	20.5	65	110	22.5	40	133	23.3

2.3 空气质量空间分布特征

2.3.1 武汉城区不同站点污染物浓度变化特征

进一步探讨军运会管控期武汉地区主要国控站点污染物的变化特征。图 3 给出了 2018 年和 2019 年的 10 月 13—28 日 5 个国控站点(汉阳月湖、汉口华桥、武昌紫阳、青山钢花、民族大道)PM_{2.5}、PM₁₀、O₃、NO₂、SO₂ 浓度和 AQI 值的变化,2018 年和 2019 年青山钢花 AQI 值最高,下降幅度也为最大,其他站点相差不大。青山钢花国控站位于武汉市钢铁基地,重工业产业集中,污染偏重。管控期青山钢花 PM_{2.5} 浓度最高($40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),其次为汉口花桥,而 5 个站点的 PM₁₀ 浓度相近,为 $48 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (民族大道)~ $55 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (汉阳月湖)。与 2018 年相比,管控期不同站点 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 下降了 15%~32%,下降幅度最大的为青山钢花。这主要由于颗粒物污染主要来自固定式燃烧、冶金和建筑活动等,开展重点企业精准管控,对全市工地进行建筑扬尘处理,有效减低了颗粒物浓度。NO₂ 浓度最高站点为武昌

紫阳(位于黄鹤楼和临江大道之间),民族大道站最低,5 个国控站下降幅度为 7%~27%;SO₂ 浓度下降幅度为 9%~40%,燃煤、燃油等工业过程以及汽车尾气为 SO₂ 和 NO₂ 主要来源之一,Cheng et al (2014)发现武汉地区污染天气主要受到静稳天气的影响,气态污染物的二次转化对高浓度 PM_{2.5} 贡献很大(刘晓咏等,2019),机动车排放和生物质燃烧进一步加剧了污染天气的强度。

军运会期间武汉市对部分柴油公交车或货车进行限行,减少了大型炼钢、石化工厂生产活动,对货车通行及港口船舶等采取了一定的管控措施,在一定程度上降低了 NO₂ 和 SO₂ 浓度,其中 NO₂ 和 SO₂ 下降幅度最大的均为武昌紫阳。但值得注意的是,O₃ 浓度在 5 个站点均出现了上升特征,说明管控措施对 O₃ 浓度影响不大,黄凡等(2020)、陈楠等(2017)均指出武汉市属于挥发性有机化合物(VOC)控制区,溶剂涂料、机动车尾气和工业排放均为 VOC 主要来源,其控制难度大。在晴空静稳的天气下,仅 NO₂ 浓度下降,O₃ 浓度无法降低。

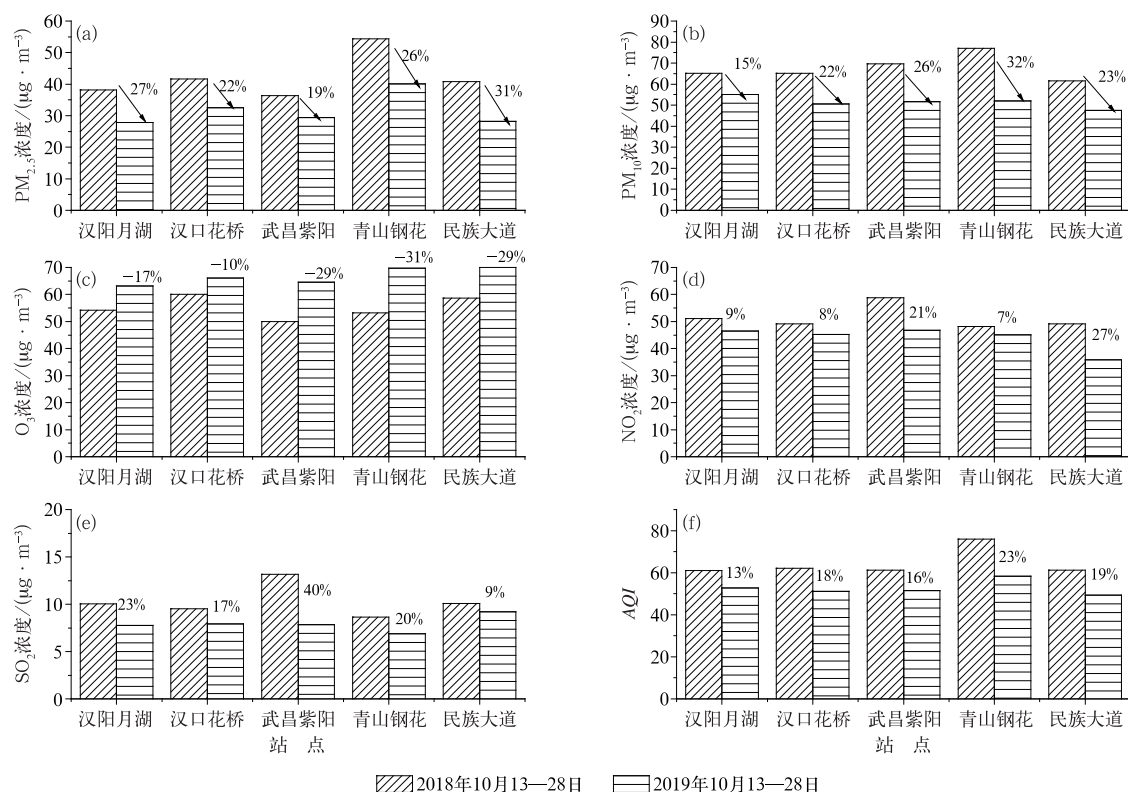


图3 2018年和2019年的10月13—28日武汉市不同国控站PM_{2.5}(a)、PM₁₀(b)、O₃(c)、NO₂(d)、SO₂(e)浓度和AQI值(f)

Fig. 3 Concentrations of PM_{2.5} (a), PM₁₀ (b), O₃ (c), NO₂ (d) and SO₂ (e) and AQI (f) at different state-controlled stations in Wuhan in 13–28 October 2018 and 2019

2.3.2 武汉市污染物浓度与周边城市对比

图4给出了管控前和管控期武汉及周边城市主要污染物浓度变化特征。管控期间虽然武汉城市圈(“1+8”城市,包括武汉、鄂州、黄冈、黄石、咸宁、孝感、天门、潜江、仙桃)的主要城市武汉、黄冈和孝感颗粒物浓度出现增长,但是增加幅度低于襄阳和信阳(图4),且与其他城市相比,武汉市颗粒物浓度在管控期间尤其是管控期Ⅱ是所涉及城市中最低。高庆先等(2015)对APEC期间北京的AQI与周边城市对比中也发现了类似的特点。NO₂浓度在管控期Ⅱ较管控前所有城市都增加,增幅为31%~54%,其中武汉NO₂浓度最高。根据武汉市污染源清单调查结果显示,武汉市NO_x排放主要来源于移动源排放,约占全市总排放量的6成,其次为工业源,占比约为30%;移动源中道路移动源排放占比较大(60%以上)。仅对部分柴油公交车或货车、货轮、集装箱车等采取管控措施,结果对NO₂浓度增加的抑制效果有限。

武汉、孝感和长沙的O₃浓度在管控期Ⅱ与管控前比有所下降(图4),而其他城市上升,信阳增幅

最大(16%)。孝感在21日O₃浓度为174 μg·m⁻³,黄冈20日为162 μg·m⁻³均达到轻度污染级别,管控措施一定程度上抑制了武汉市O₃浓度达到轻度污染。军运会期间武汉O₃浓度比管控前降低,但依然高于长沙地区的数值,且比2018年同期浓度也有所增加,说明O₃前体物控制难度大,赵金帅等(2020)指出在郑州少数民族运动会期间O₃浓度降幅仅为3.7%,前体物VOC低于历史同期,机动车尾气贡献最大。由于O₃生成与前体物之间呈非线性关系,需要考虑进行NO_x和VOC协同管控(Li et al, 2017)。

2.4 气象条件对空气质量影响

2.4.1 军运会不同阶段气象条件分析

管控期Ⅰ(13—16日)湖北省经历了一次中等强度冷空气且伴随降水,这一阶段气压和风速最大(表3),且高于2014—2018年同期,颗粒物、NO₂和O₃浓度最低(表1)。14日PM₁₀和O₃出现小幅上升(图5),PM₁₀浓度上升幅度大于PM_{2.5},造成这种现象主要是因为冷空气的输送作用,外源输送对湖

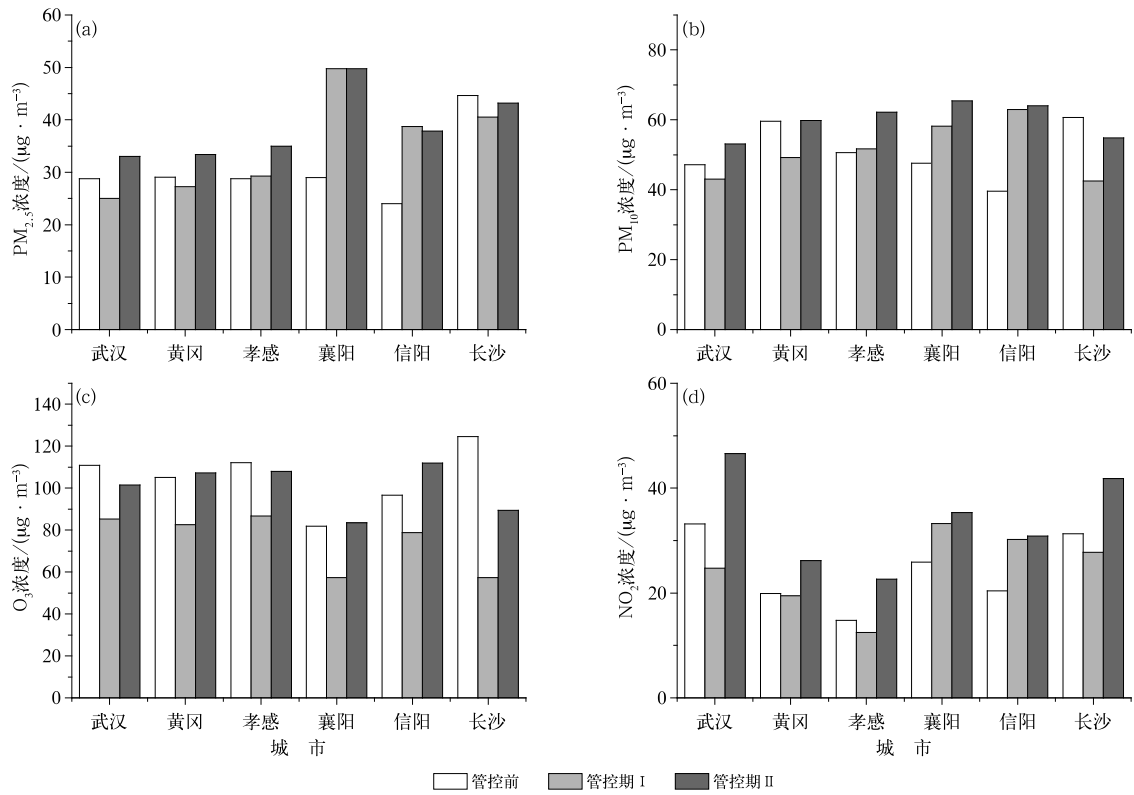


图 4 2019 年军运会不同管控阶段武汉及其他城市 $PM_{2.5}$ (a)、 PM_{10} (b)、 O_3 (c)、 NO_2 (d) 浓度
Fig. 4 Concentrations of $PM_{2.5}$ (a), PM_{10} (b), O_3 (c), NO_2 (d) in different control stages in Wuhan and the surrounding cities during the 7th CISM Military World Games in 2019

表 3 2019 年军运会不同管控期及过去五年 (2014—2018 年) 同期气象要素特征值
Table 3 Values of meteorological elements in different stages during the 7th CISM Military World Games in 2019 and in the same period of 2014—2018

时段	气压 /hPa	气温 /℃	相对湿度 /%	风速 /($m \cdot s^{-1}$)	总降水量 /mm	总日照时数 /h
2019 年	管控前	1013.3	21.3	77.0	1.7	15.6
	管控期 I	1022.8	18.3	77.7	2.5	11.0
	管控期 II	1017.7	16.4	78.2	0.9	9.0
2014— 2018 年	管控前	1015.4	19.7	78.5	1.5	26.2
	管控期 I	1018.0	17.3	82.9	1.4	6.9
	管控期 II	1016.0	17.3	82.6	1.3	45.7

北省污染天气贡献明显 (祁海霞等, 2019; Zhou et al, 2019), 14 日湖北大部 PM_{10} 浓度由 $0 \sim 50 \mu g \cdot m^{-3}$ 上升至大于 $50 \sim 150 \mu g \cdot m^{-3}$, 15 日在风和降水的影响下颗粒物浓度下降, 岳岩裕等 (2018) 对武汉市冷锋过程的研究也发现颗粒物浓度会出现先升后降的特点。

管控期 II (17—28 日) 出现较明显的污染物浓度上升, 17—21 日 500 hPa 以偏北气流为主, 天气晴好, 气温逐渐回升; 850 hPa 反气旋环流为主; 地面气压下降、处于均压场控制之下, 风速减小; 相对湿度和能见度处于低值 (图 5); 日照高于近五年平

均值, 光化学反应强烈, 因此反应性气体浓度上升明显, 成为首要污染物, 颗粒物浓度也有所累积, 但是上升幅度偏小。22 日受低空切变线影响, 湖北大部出现小到中雨, 在降水的作用下武汉市 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 NO_2 浓度开始下降。23—27 日 500 hPa 再次转为平直气流, 武汉市以阴天或弱降水为主, 24—26 日有一次冷空气, 风速增大有利于污染物稀释和扩散 (江琪等, 2019)。17—28 日降水量与五年同期比明显偏小 (表 3), 降水对大气污染物的冲刷、稀释作用明显, 尤其是有效降水 (大于 5 mm) 对大气污染物的湿沉降作用是净化大气的重要机制, 有效降水

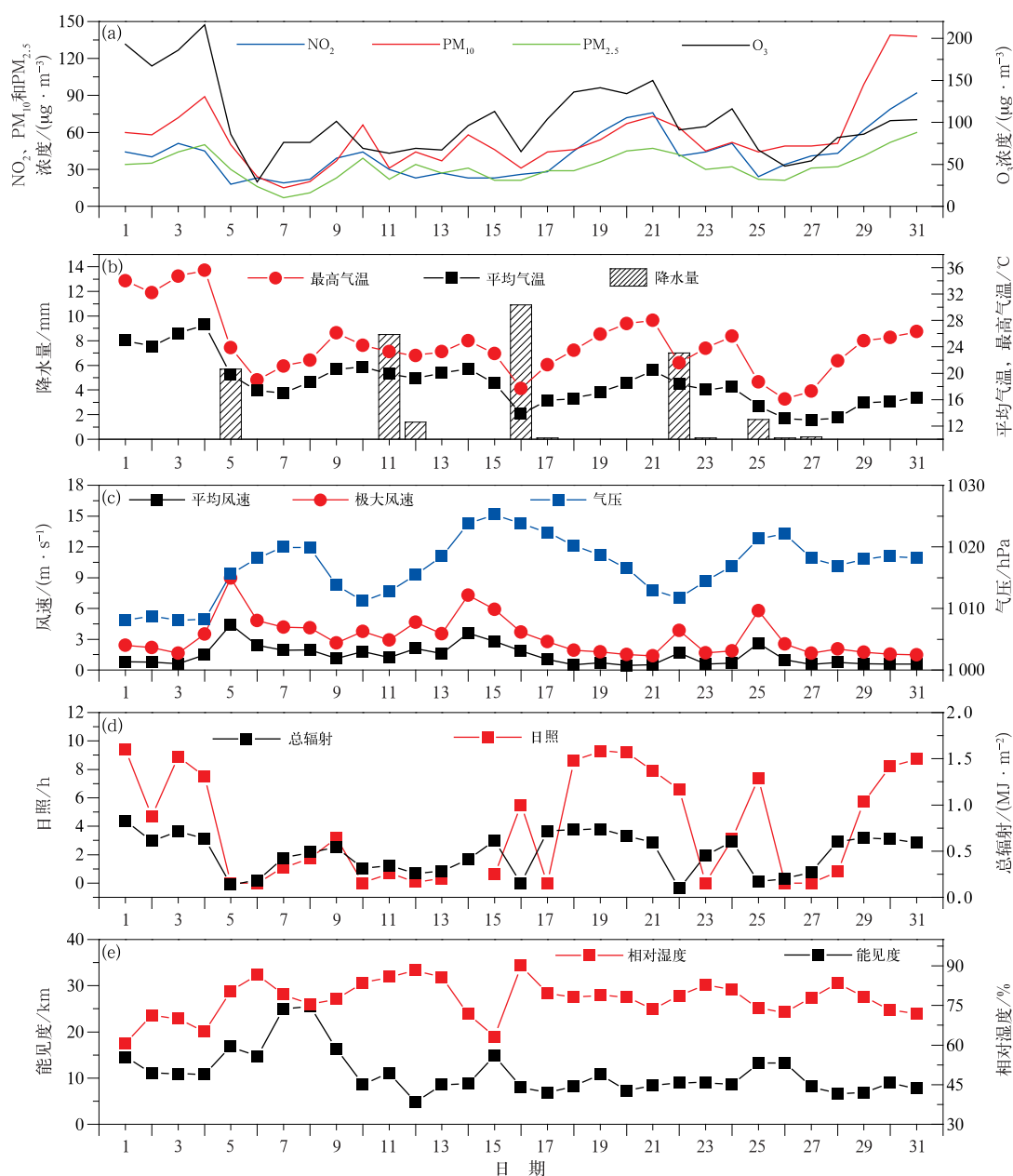


图5 2019年10月1—31日武汉市污染物浓度和气象要素随时间的变化

Fig. 5 Variations of pollutant concentrations and meteorological elements in Wuhan from 1 to 31 October 2019

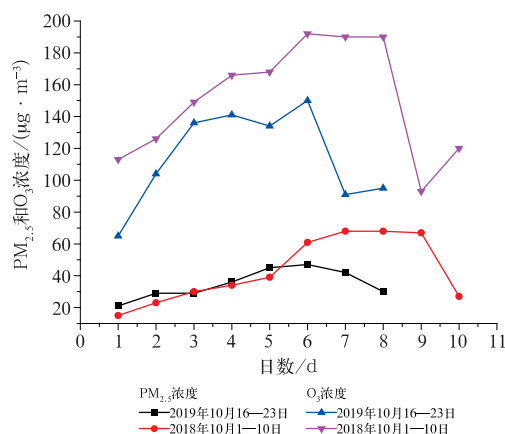
日数越多,越有利于污染物清除,管控期Ⅱ降水量和有效降水日数(0.6 d)均处于低值,不利于污染物湿清除。且风速由管控期Ⅰ的偏大转为管控期Ⅱ偏小,风速小则污染物累积效应更突出。风和降水都有利于污染物的累积,但是颗粒物浓度在这一阶段下降,说明管控措施对颗粒物浓度下降贡献明显。

管控后(29—31日)高空转为偏北气流,湖北大部多云转晴,NO₂和PM₁₀浓度明显上升。

2.4.2 相似天气背景下污染过程对比分析

挑选与军运会期间过程1(2019年10月16—

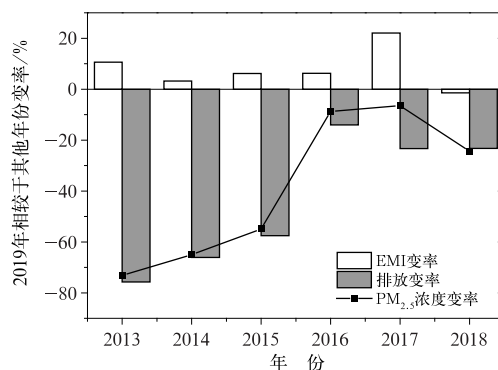
23日)天气背景相似的过程进行分析,在2017—2019年10月的5次污染过程(表2)中仅过程2(2018年10月1—10日)的过程天气形势与过程1相似。2018年10月2—4日处于500 hPa高空槽后,5日转为脊控制,6—7日为平直西风气流,8—9日受到低槽影响海平面气压场以均压场为主,9日地面有中等强度冷空气。图6为两次过程逐日浓度变化,过程1和过程2的PM_{2.5}初始浓度和增长速率基本相同,但是在第五天出现了变化,过程2的第五天和第六天,即2018年10月5—6日出现了PM_{2.5}

图 6 不同过程武汉市 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度随时间的变化Fig. 6 Concentration variations of PM_{2.5} and O₃ with time in different processes in Wuhan

浓度明显增长,但过程 1 的第五天和第六天,即 2019 年 10 月 20—21 日 PM_{2.5} 浓度增速缓慢。过程 1 的 O₃ 浓度增速比过程 2 快,同样的天气背景下, O₃ 浓度受管控措施影响小,而 PM_{2.5} 出现了增速放缓的情况。

2.5 气象条件及减排对 PM_{2.5} 浓度变化影响

使用 EMI 指数评估气象条件的影响,其指数表征综合气象条件对 PM_{2.5} 浓度变化的贡献。该指数考虑了大气对污染物的稀释扩散、输送、沉降等物理过程,可定量诊断与预测污染期间气象条件的变化(国家气象中心和中国气象科学研究院, 2019)。在污染源相对稳定的情况下,EMI 和 PM_{2.5} 浓度的变化由气象条件决定,二者具有较好的相关性。对 2019 年 10 月 PM_{2.5} 浓度和 EMI 与其他年份同期做比较(图 7),可以看出 2019 年 10 月 PM_{2.5} 浓度与 2013—2018 年相比均为负值,表现为浓度下降趋势。颗粒物浓度的变化考虑是由气象条件和排放源的变化共同影响,2019 年与 2013—2017 年相比 EMI 为正值,范围为 3.2%~22%,说明 2019 年的气象条件相对于 2013—2017 年是不利于 PM_{2.5} 浓度降低的。2019 年 PM_{2.5} 浓度相较于其他年份下降率为 -73.2%~-6.5%,通过 EMI 变率和浓度变率计算得出排放变率,为 -75.7%~-14.0%,可以看出 PM_{2.5} 浓度下降主要是减排的贡献。与 2018 年相比 2019 年 EMI 为负值,说明 2019 年相对于 2018 年气象条件转好,有利于污染物扩散。对比 2018 年 PM_{2.5} 浓度,2019 年 PM_{2.5} 浓度下降也是近三年(2016—2018 年)最明显的,比 2018 年下降了 24%,

图 7 2019 年 10 月 PM_{2.5} 浓度变率、EMI 变率和排放变率Fig. 7 PM_{2.5} concentration variability, EMI variability and emission variability in October 2019

其中减排的贡献为 23%,其贡献最为明显。

3 结论与讨论

军运会管控措施对颗粒物浓度下降或抑制其上升幅度作用显著,与过去五年同期相比,颗粒物浓度下降最明显,与长沙等其他城市相比亦最低,相近时间段内未采取管控措施,PM_{2.5} 上升速度偏快。O₃ 和 NO₂ 问题突出,作为首要污染天数占比达 83%,武汉市 O₃ 浓度在管控期 II 高于其他年份和长沙市,城市圈孝感和黄冈 O₃ 浓度超标,虽然武汉市 O₃ 浓度未明显下降,但管控仍起了一定作用,军运会期间 O₃ 未达轻度污染级别。NO₂ 在管控期 II 也出现了增加,与管控前和其他城市相比偏高,但与过去五年平均值相比偏低了 21%,货车和港口船舶的精准管理,降低了 NO₂ 的浓度。武汉城区 5 个站点中青山钢花 AQI 值和颗粒物下降幅度最大,这一区域为武汉重工业基地,大型企业管控措施执行效果明显。

管控期 II (17—21 日)以反气旋环流为主,降水量和有效降水日数均处于低值,且风速偏小、累积效应突出;日照和总辐射处于高值,光化学反应强烈,静稳形势有利于 O₃ 和颗粒物浓度的共同上升。2018 年 10 月 1—10 日和 2019 年 10 月 16—23 日天气背景相似,是否采取管控措施在第五天出现了差异,2019 年 10 月 20—21 日 PM_{2.5} 增速缓慢,而 2018 年继续明显增长。O₃ 浓度增速基本不受管控影响,相近时间段内 3 次过程 AQI 和 O₃ 浓度的上升速度相近,但军运会期间 PM_{2.5} 上升速度最小且峰值浓度最低。

颗粒物浓度的变化受气象条件和排放源变化的

共同影响。由于管控期 I 时间短且伴有大风降水,管控期 II 管理措施更严格,但气象条件管控期 I 整体比管控期 II 更有利于污染物浓度降低,管控期 I 的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 NO_2 浓度在四个阶段中最低。2019 年 10 月与 2013—2017 年相比 EMI 为正值,范围为 $3.2\% \sim 22\%$,说明 2019 年的气象条件不利于污染物浓度降低,而 2019 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相较于其他年份下降率为 $-73.2\% \sim -6.5\%$,排放变率为 $-75.7\% \sim -14.0\%$,可以看出减排是 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降的主要原因。

本文对气象和排放两大因素贡献的区分还有待进一步加强。基于 EMI 定量分析气象条件对污染物的影响仅能评估 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化,而对于 NO_2 和 O_3 浓度变化的气象贡献则无法用其定量描述。但是军运会期间 O_3 和 NO_2 浓度上升现象明显,需要依托于数值模拟评估管控前后臭氧前体物和 NO_2 等浓度的差异,从而得到气象条件对 O_3 生成的贡献。

参考文献

- 陈镭,周广强,毛卓成,等,2020. 上海地区 2017 年三次短时重度污染过程变化特征及其气象影响因素[J]. 气象,46(5):675-686.
- Chen L, Zhou G Q, Mao Z C, et al, 2020. Variation characteristics and meteorological impact factors of three short-time severe air pollutions in Shanghai in 2017[J]. Meteor Mon, 46(5):675-686(in Chinese).
- 陈敏,马雷鸣,魏海萍,等,2013. 气象条件对上海世博会期间空气质量影响[J]. 应用气象学报,24(2):140-150.
- Chen M, Ma L M, Wei H P, et al, 2013. Weather impacts on air quality of the World Expo in Shanghai[J]. J Appl Meteor Sci, 24(2):140-150(in Chinese).
- 陈楠,陆兴成,姚腾,等,2017. 湖北臭氧分布特征及其管控措施[J]. 中国环境监测,33(4):150-158.
- Chen N, Lu X C, Yao T, et al, 2017. Ozone distribution characteristics and its control measures in Hubei[J]. Environ Monit China, 33(4):150-158(in Chinese).
- 程念亮,李云婷,张大伟,等,2016. 2014 年 APEC 期间北京市空气质量改善分析[J]. 环境科学,37(1):66-73.
- Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, et al, 2016. Improvement of air quality during APEC in Beijing in 2014[J]. Environ Sci, 37(1):66-73(in Chinese).
- 高庆先,刘俊蓉,王宁,等,2015. APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析[J]. 环境科学,36(11):3952-3960.
- Gao Q X, Liu J R, Wang N, et al, 2015. Analysis on regional characteristics of air quality index and weather situation in Beijing and its surrounding cities during the APEC[J]. Environ Sci, 36(11):3952-3960(in Chinese).
- 国家气象中心,中国气象科学研究院,2019. $\text{PM}_{2.5}$ 气象条件评估指数(EMI): QX/T 479—2019[S]. 北京:气象出版社.
- National Meteorological Centre, Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2019. Evaluation on meteorological condition index of $\text{PM}_{2.5}$ pollution: QX/T 479—2019[S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 胡春梅,陈道劲,周国兵,等,2020. 基于自组织神经网络算法的重庆秋冬季空气污染与天气分型的关系[J]. 气象,46(9):1222-1234.
- Hu C M, Chen D J, Zhou G B, et al, 2020. Relationship between air pollution events in autumn and winter in Chongqing and the classification of synoptic situation based on self-organizing maps[J]. Meteor Mon, 46(9):1222-1234(in Chinese).
- 黄凡,周家斌,李红,等,2020. 武汉市夏冬季典型大气污染过程的成因与来源分析[J]. 环境科学研究,33(2):280-288.
- Huang F, Zhou J B, Li H, et al, 2020. Analysis of causes and sources of typical air pollution events in summer and winter in Wuhan City[J]. Res Environ Sci, 33(2):280-288(in Chinese).
- 江琪,王飞,张恒德,等,2019. 2016 年冬季京津冀豫大气污染时空分布及影响因子研究[J]. 气象,45(5):695-704.
- Jiang Q, Wang F, Zhang H D, et al, 2019. Analysis of spatio-temporal distribution and connecting factors of air pollution in Beijing, Tianjin, Shijiazhuang and Zhengzhou in winter of 2016[J]. Meteor Mon, 45(5):695-704(in Chinese).
- 刘晓咏,王自发,王大玮,等,2019. 京津冀典型工业城市沙河市大气污染特征及来源分析[J]. 大气科学,43(4):861-874.
- Liu X Y, Wang Z F, Wang D W, et al, 2019. Characteristics and source identification of air pollution in Shahe, a typical industrial city in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Chin J Atmos Sci, 43(4):861-874(in Chinese).
- 刘子锐,孙杨,李亮,等,2011. 2008 奥运和后奥运时段北京大气颗粒物质量浓度和数浓度比对研究[J]. 环境科学,32(4):913-923.
- Liu Z R, Sun Y, Li L, et al, 2011. Particle mass concentrations and size distribution during and after the Beijing Olympic Games[J]. Environ Sci, 32(4):913-923(in Chinese).
- 祁海霞,崔春光,赵天良,等,2019. 2015 年冬季湖北省 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染传输特征及影响天气系统的数值模拟[J]. 气象,45(8):1113-1122.
- Qi H X, Cui C G, Zhao T L, et al, 2019. Numerical simulation on the characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ heavy pollution and the influence of weather system in Hubei Province in winter 2015[J]. Meteor Mon, 45(8):1113-1122(in Chinese).
- 王占山,李云婷,张大伟,等,2016. 2014 年 APEC 会议期间北京市空气质量分析[J]. 环境科学学报,36(2):675-683.
- Wang Z S, Li Y T, Zhang D W, et al, 2016. Analysis on air quality in Beijing during the 2014 APEC Conference[J]. Acta Scient Circumstant, 36(2):675-683(in Chinese).
- 吴兑,廖碧婷,吴晟,等,2012. 2010 年广州亚运会期间灰霾天气分析[J]. 环境科学学报,32(3):521-527.
- Wu D, Liao B T, Wu S, et al, 2012. Investigation on hazy weather during the Guangzhou 2010 Asian Games[J]. Acta Scient Circumstant, 32(3):521-527(in Chinese).
- 谢放尖,李文青,喻义勇,等,2014. 南京亚青会空气质量保障回顾性评价及启示[J]. 环境监控与预警,6(2):1-4.
- Xie F J, Li W Q,

- Yu Y Y, et al, 2014. Retrospective evaluation of air quality protection measures and its inspiration during the Asian Youth Games in Nanjing[J]. *Environ Monit Forewarning*, 6(2): 1-4 (in Chinese).
- 岳岩裕, 周悦, 王晓玲, 等, 2018. 武汉市霾天气过程冷锋和降水对 $PM_{2.5}$ 输送和清除效应分析[J]. *环境科学学报*, 38(12): 4612-4619.
- Yue Y Y, Zhou Y, Wang X L, et al, 2018. Analysis on transport/purification effect by cold front and precipitation during haze day in Wuhan[J]. *Acta Scient Circumstant*, 38(12): 4612-4619 (in Chinese).
- 张礁石, 陆亦怀, 桂华侨, 等, 2016. APEC 会议前后北京地区 $PM_{2.5}$ 污染特征及气象影响因素[J]. *环境科学研究*, 29(5): 646-653.
- Zhang J S, Lu Y H, Gui H Q, et al, 2016. Variations of $PM_{2.5}$ pollution and related meteorological factors before and after the 2014 APEC Conference in Beijing[J]. *Res Environ Sci*, 29(5): 646-653 (in Chinese).
- 赵辉, 郑有飞, 吴晓云, 等, 2015. 青年奥林匹克运动会期间南京市主要大气污染物浓度变化与分析[J]. *环境化学*, 34(5): 824-831.
- Zhao H, Zheng Y F, Wu X Y, et al, 2015. Variation and analysis of air pollutants concentration in Nanjing during the Youth Olympic Games[J]. *Environ Chem*, 34(5): 824-831 (in Chinese).
- 赵金帅, 于世杰, 王楠, 等, 2020. 郑州市少数民族运动会期间 O_3 及 VOCs 污染特征的演变和评估[J]. *环境科学*, 41(10): 4436-4445.
- Zhao J S, Yu S J, Wang N, et al, 2020. Evolution and evaluation of O_3 and VOCs in Zhengzhou during the National Traditional Games of Ethnic Minority's period[J]. *Environ Sci*, 41(10): 4436-4445 (in Chinese).
- 赵军平, 罗玲, 郑亦佳, 等, 2017. G20 峰会期间杭州地区空气质量特征及气象条件分析[J]. *环境科学学报*, 37(10): 3885-3893.
- Zhao J P, Luo L, Zheng Y J, et al, 2017. Analysis on air quality characteristics and meteorological conditions in Hangzhou during the G20 Summit[J]. *Acta Scient Circumstant*, 37(10): 3885-3893 (in Chinese).
- Chen Z Y, Xie X M, Cai J, et al, 2018. Understanding meteorological influences on $PM_{2.5}$ concentrations across China: a temporal and spatial perspective[J]. *Atmos Chem Phys*, 18: 5343-5358.
- Cheng H R, Gong W, Wang Z W, et al, 2014. Ionic composition of submicron particles ($PM_{1.0}$) during the long-lasting haze period in January 2013 in Wuhan, Central China[J]. *J Environ Sci*, 26(4): 810-817.
- Huang K, Zhang X Y, Lin Y F, 2015. The "APEC Blue" phenomenon: regional emission control effects observed from space[J]. *Atmos Res*, 164/165: 65-75.
- Li K W, Chen L H, Ying F, et al, 2017. Meteorological and chemical impacts on ozone formation: a case study in Hangzhou, China[J]. *Atmos Res*, 196: 40-52.
- Lin W, Xu X, Zhang X, et al, 2008. Contributions of pollutants from North China Plain to surface ozone at the Shangdianzi GAW Station[J]. *Atmos Chem Phys*, 8(19): 5889-5898.
- Tang G, Zhu X, Hu B, et al, 2015. Impact of emission controls on air quality in Beijing during APEC 2014: lidar ceilometer observations[J]. *Atmos Chem Phys*, 15: 12667-12680.
- Wei X, Gu X F, Chen H, et al, 2016. Multi-scale observations of atmosphere environment and aerosol properties over North China during APEC Meeting Periods[J]. *Atmosphere*, 7(1): 4.
- Zhou Y, Bai Y Q, Yue Y Y, et al, 2019. Characteristics of the factors influencing transportation and accumulation processes during a persistent pollution event in the middle reaches of the Yangtze River, China[J]. *Atmos Pollut Res*, 10(5): 1420-1434.
- Zhou Y, Wu Y, Yang L, et al, 2010. The impact of transportation control measures on emission reductions during the 2008 Olympic Games in Beijing, China[J]. *Atmos Environ*, 44(3): 285-293.

(本文责编:何晓欢)