Analysis of the Influence of Weather Conditions on Persistent Ozone Pollution in Chengdu in Summer

Xiu Liu

Chengdu University of Information Technology, CUIT, Chengdu Sichuan Email: liuxiucuit@outlook.com

Received: Oct. 28th, 2019; accepted: Nov. 12th, 2019; published: Nov. 19th, 2019

Abstract

Based on the monitoring data of ozone, NO₂, CO and PM_{2.5} at 9 environmental monitoring stations in Chengdu from April to October in 2014-2015, and the meteorological observation data, the continuous ozone pollution in Chengdu in the past four years was analyzed. Comparison analysis of ozone concentration and meteorological factors was conducted for urban area and contrast station of Chengdu. A typical ozone pollution episode in August 2016 was selected and studied in detail. The main conclusions are as follows: ozone pollution days and the continuous pollution events were the most serious in July and May. Continuous ozone pollution is closely related to the weather system. There was a significantly positive correlation between ozone concentration and temperature during the continuous pollution processes. Continuous high temperature (daily highest temperature above 30°C), low humidity, sunny to low cloud weather, no precipitation, small wind speed, westerly and northwest wind were favorable for continuous ozone pollution in Chengdu, subtropical anticyclone moved westward causing high temperature in Sichuan Basin and played an important role in continuous ozone pollution in Chengdu and surrounding areas.

Keywords

Persistent Ozone Pollution, Time Distribution, Weather Conditions, Chengdu

天气条件对成都市夏季臭氢持续污染的 影响分析

刘 秀

成都信息工程大学大气科学学院,四川 成都

Email: liuxiucuit@outlook.com

收稿日期: 2019年10月28日; 录用日期: 2019年11月12日; 发布日期: 2019年11月19日

文章引用: 刘秀. 天气条件对成都市夏季臭氧持续污染的影响分析[J]. 气候变化研究快报, 2019, 8(6): 792-801. DOI: 10.12677/ccrl.2019.86087

摘要

通过统计2014~2017年4~10月成都市9个环境监测站点的O₃、NO₂、CO、PM_{2.5}的监测资料以及气象观测资料,分析了这四年成都市臭氧持续污染特征,对比分析了成都市城区和清洁对照站点臭氧浓度和气象要素的关系,并以2016年典型个例分析了天气条件对成都市夏季臭氧持续污染的影响。结果表明:成都市臭氧污染与3天以上臭氧持续污染事件多发生在5月和7月;臭氧持续污染与天气系统密切相关,持续污染过程中臭氧浓度与温度呈现明显的正相关;持续高温(日最高气温30℃以上)、较低湿度、晴朗少云天气、无降水、小风速、西风、西北风对成都市臭氧持续污染有利;夏季副热带高压的西伸和维持造成的持续高温天气对成都及周边城市臭氧持续性污染有重要影响。

关键词

臭氧持续污染,影响因素,天气条件,成都

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



Open Access

1. 引言

2013 年实施《大气污染防治行动计划》以来,全国 SO_2 、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 浓度有大幅度的降低,但是臭氧污染问题并没有得到缓解,甚至更加严重。成都市臭氧日最大 8 小时平均浓度(90 百分位)值从 2013 年的 157 μ g/m³ 升高至 2018 年的 167 μ g/m³。这与城市发展、能源结构转变、汽车保有量迅速增加有很大关系。臭氧主要来源于汽车尾气中的 NOX、CO 等污染物的光化学反应[1],以及 $PM_{2.5}$ 的气溶胶化学作用 [2]。O₃ 浓度高低除了与相关前体物浓度有关外,还与天气条件有密切联系。气象因子对近地面 O₃ 浓度有着重要的作用[3],O₃ 浓度和温度、气压、湿度、风速风向等各气象要素存在相关性[4] [5] [6] [7] [8],天气条件的改变对 O₃ 的时空分布影响较大,其中温度、湿度、风向风速的影响很大。近地面臭氧浓度随着气温的升高而升高;而降水、湿度的影响刚好与气温相反;大风或有雾的天气条件也会成为近地面臭氧浓度增高的原因[9]。刘源在对四川省大气污染概况及特点的分析研究中认为成都地区风速小,相对湿度较大,夜间经常出现逆温,静稳天气多,不利于污染物的扩散,容易造成持续污染[10]。

本文主要利用成都市臭氧持续污染事件分析成都市夏半年臭氧持续污染的特征;利用典型臭氧持续污染过程中臭氧前体物的时间分布以及各气象因子的分布来探究天气条件对臭氧持续污染的影响,为成都地区大气臭氧污染的防控提供科学支撑。

2. 材料与方法

根据环保部城市 AQI 日值计算标准《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ633-2012),定义浓度超过国家环境空气质量二级标准的污染物,即 *IAQI* 大于 100 的污染物为超标污染物[11]。空气质量分指数(*IAQI*)的指数范围为 0~500。指数越大,级别越高,污染越严重,对人体的健康影响更大。根据公式:

$$IAQI_{P} = \frac{IAQI_{Hi} - IAQI_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_{P} - BP_{Lo}) + IAQI_{Lo}$$

式中: $IAQI_P$ 为污染物项目 P 的空气质量分指数, C_P 为污染物项目 P 的质量浓度值, BP_{Hi} 为与 C_P 相近的

污染物浓度限值的高位, BP_{Lo} 为与 C_P 相近的污染物浓度限值的低位值, $IAQI_{Hi}$ 为与 BP_{Hi} 对应的空气质量分指数, $IAQI_{Lo}$ 为与 BP_{Lo} 对应的空气质量分指数。

本文共使用成都市 8 个国控环境空气自动监测子站臭氧监测数据,数据来源于中国生态环境部公共网站: http://beijingair.sinaapp.com/,因成都市区内各监测站点相距很近,且地形特征与经济发展状况相对一致,因此将各环境站点数据计算平均值作为成都市区的臭氧平均浓度。

3. 结果与分析

将 2014~2017 年 4~10 月成都市出现臭氧轻度污染(IAQI > 100),且持续天数大于 3 天(包括 3 天)定义为一次持续臭氧污染过程。根据此标准统计得出图 1,四年间臭氧持续污染次数分布均呈现出"双峰"的形式。四年间夏半年臭氧持续污染高发月份主要集中在 5 月、7 月,7 月臭氧持续污染次数最多,共计 8 次,其次为 5 月,臭氧持续污染次数共计 7 次。四年间在 6 月、9 月、10 月均只有 1 次持续污染事件。其中,四年间臭氧持续污染过程持续时间达到 5 天及以上的次数共有 8 次,其中,2015 年 3 次,2016 年 2 次,2017 年 3 次,且多发生在 5 月、7 月(表 1)。

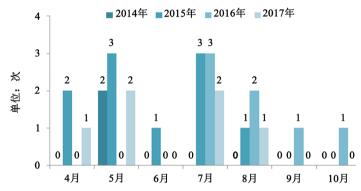


Figure 1. Monthly distribution of ozone persistent pollution events from April to October in 2014-2017 图 1. 2014~2017 年 4~10 月臭氧持续污染事件月分布

Table 1. Statistics of ozone continuous pollution processes from April to October of 2014-2017 表 1. 2014~2017 年 4~10 月臭氧持续污染过程统计

年份	污染过程时间	持续天数	臭氧浓度和污染日数					
			平均值±标准差 (µg/m³)	最高浓度 (μg/m³)	轻度污染(天)	中度污染(天)	重度污染(天)	
2014	5.17~5.19	3	179 ± 7.59	189	3	0	0	
2014	5.30~6.1	3	232 ± 12.71	248	0	3	0	
	4.15~4.17	3	189 ± 17.79	214	3	0	0	
	4.26~4.29	4	193 ± 8.03	204	4	0	0	
	5.6~5.10	5	191 ± 12.98	203	5	0	0	
	5.12~5.15	4	200 ± 31.80	239	2	2	0	
2015	5.18~5.20	3	211 ± 17.64	234	2	1	0	
2015	6.16~6.18	3	195 ± 16.05	207	3	0	0	
	7.10~7.12	3	192 ± 4.51	198	3	0	0	
	7.16~7.20	5	200 ± 13.70	210	5	0	0	
	7.24~7.29	6	186 ± 6.78	197	6	0	0	
	8.20~8.23	4	190 ± 23.76	226	3	1	0	

Continued							
	7.1~7.3	3	172 ± 10.86	188	3	0	0
	7.15~7.17	3	214 ± 47.79	279	2	1	0
	7.19~7.21	3	176 ± 10.61	191	3	0	0
2016	8.6~8.10	5	180 ± 7.15	191	5	0	0
	8.19~8.25	7	206 ± 29.24	250	3	4	0
	9.9~9.11	3	178 ± 3.46	182	3	0	0
	10.1~10.3	3	184 ± 2.94	188	3	0	0
	4.29~5.1	3	180 ± 15.94	200	3	0	0
	5.17~5.19	3	176 ± 14.99	197	3	0	0
2017	5.26~5.30	5	180 ± 15.59	205	5	0	0
2017	7.9~7.14	6	224 ± 36.42	291	4	1	1
	7.23~7.28	6	199 ± 13.10	221	5	1	0
	8.12~8.14	3	197 ± 4.04	203	3	0	0

臭氧持续污染过程中臭氧浓度与温度有较强的正相关(图 2),相关系数约为 0.76。统计分析四年间所有持续污染过程中气象要素,持续污染过程平均温度最低为 19.5℃,过程中最低温度为 16.9℃,表明日平均温度连续几天维持在 20℃左右容易导致臭氧持续污染。持续污染过程平均风速 < 2.5 m/s,风向主要为西风、西北风。平均气压低于 950 hPa,气压较低。

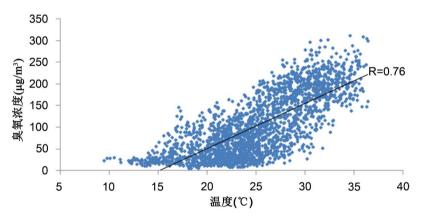


Figure 2. Ozone concentration-temperature scatter plot during continuous pollution **图** 2. 持续污染过程中小时臭氧浓度 - 温度散点图

4. 典型臭氧污染过程分析

4.1. 持续臭氧污染过程特征描述

根据表 1 可以看出 2016 年 8 月 19~25 日臭氧持续污染过程持续时间最长,达到 7 天,最大 8 小时滑动平均浓度值达到 250 μg/m³,轻度污染 3 天,中度污染 4 天。故此,选取该个例,并扩选污染过程开始前一天、结束后一天,对臭氧持续污染过程中气象因子的影响进行研究分析。

在此次典型 O₃ 持续污染过程中,各监测站点臭氧小时浓度日变化曲线呈单峰状态(图 3),对照站灵岩寺峰值落后于成都市区内各监测站峰值且峰值明显小于成都市区内各监测站峰值。19~24 日成都市区 臭氧污染达到中度污染等级,其中梁家巷 8 月 19 日臭氧最大小时浓度达到 371 μg/m³。

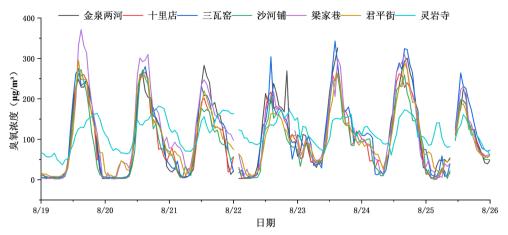


Figure 3. Ozone hourly concentration curve of various monitoring stations in Chengdu from August 19 to 25, 2016 **图 3.** 2016 年 8 月 19~25 日成都市各监测站臭氧小时浓度曲线

由臭氧持续污染期间每日污染物浓度的逐时分布可以看出 CO 和 NO_2 浓度日变化规律基本一致(图 4),呈双峰分布,在上午 10 出现一个峰值,这与傍晚交通高峰与夜间大型运输车辆排放的污染物累积有关; O_3 则呈现出明显的单峰分布特征,峰值出现在 15h 左右,滞后于 CO 和 NO_2 峰值浓度,这与早上交通高峰后污染物累积和人类活动排放有关。 O_3 峰值滞后是由于臭氧本身不是污染源排出的一次污染物,而是在大气中光化学反应过程中形成的二次污染物,交通、工业生产等人类生产生活活动使用大量的化石燃料,排放出多种 O_3 前体物(NOx, VOCs, CO 等),还有自然源如植被排放的 BVOCs,这些污染前体物在白天强的光照作用下发生光化学反应,生成 O_3 ;夜间由于没有太阳光的作用,但是由于 NO 继续与 O_3 反应生成 NO_2 ,即大气中 NO 在夜间对 O_3 的消耗作用加强,所以夜间臭氧浓度会下降[12],故臭氧呈现单峰分布特征。

大气环境中的颗粒态污染物 $PM_{2.5}$ 浓度在下午逐渐降低,夜间和上午浓度较高。下午太阳辐射强,气温高,相对湿度低,低层对流活动增强,有利于污染物稀释和扩散,因而颗粒物浓度较低;夜间,随着太阳辐射减弱,气温降低,相对湿度增加,大气湍流运动变弱,混合层高度降低,导致污染物在近地面堆积。从图 4 中可以发现, O_3 浓度高值时间段对应 $PM_{2.5}$ 低值时间段,这是因为当颗粒物浓度较高时,气溶胶粒子通过散射和吸收太阳辐射减弱光化学反应的程度,影响 O_3 生成,造成 O_3 浓度降低[13] [14];随着 $PM_{2.5}$ 浓度的降低,太阳辐射增强, O_3 生成的光化学反应条件变得充分, O_3 浓度升高。

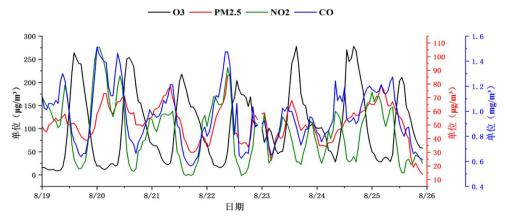


Figure 4. Diurnal variation curve of pollutant concentration in Chengdu from August 19 to 25, 2016 图 4. 2016 年 8 月 19~25 日成都市污染物浓度日变化曲线

4.2. 臭氧浓度与气象要素的关系分析

温度曲线与 O_3 浓度曲线趋势基本一致(图 5),白天 O_3 浓度随温度升高而升高,夜间 O_3 浓度随温度降低而降低。在成都市区, O_3 浓度峰值出现超前于温度峰值。19 日成都市区温度骤然升高,最高温度达到 34°C以上,随着气温升高, O_3 浓度也骤然上升, O_3 小时浓度最高值达到 264 $\mu g/m^3$,持续 6 天的高温导致臭氧污染维持,直到 26 日温度略有降低, O_3 污染过程才结束。对照站灵岩寺与成都市区温度与臭氧浓度的关系存在差异, O_3 浓度峰值出现滞后于温度峰值,但 O_3 浓度总体变化趋势一致, O_3 浓度也随气温升高而升高,但没有出现 O_3 污染超标情况,灵岩寺区域污染物排放较少, O_3 前体物浓度低,存在成都市区 O_3 向该区域输送的现象。总体而言,在成都市区 O_3 持续污染过程开始前的日最高温度明显低于污染过程中日最高温度,污染过程结束后日最高温度明显降低,可见持续高温(气温达到 30°C以上)有利于臭氧污染的维持。

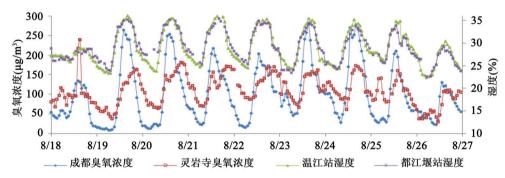


Figure 5. Diurnal changes in ozone and temperature in Chengdu City and Lingyan Temple during the continuous ozone pollution process

图 5. 持续臭氧污染过程期间成都市区和灵岩寺臭氧与温度日变化

相对湿度日变化趋势与 O_3 浓度日变化趋势呈相反的关系(图 6),这是因为大气中的水汽有利于 O_3 前体物和大气中自由基的累积,从而影响光化学反应,且较高的相对湿度有利于污染物的湿清除,因而较高的相对湿度不利于 O_3 的生成和累积[15]。从 18 日至 26 日相对湿度与臭氧浓度的变化看,18 日成都地区相对湿度维持在 70%以上,臭氧并未达到污染程度,19 日至 25 日相对湿度日变化呈单峰状态,夜间湿度上升,基本维持在 80%以上,到白天相对湿度逐渐降低,在 15 点左右达到日最低值,与 O_3 浓度峰值出现的时间相同。26 日相对湿度日变化趋势与臭氧污染过程中相对湿度日变化趋势一致,但 O_3 浓度并未出现超标情况。这是因为,根据国内外研究,高温低湿的条件有利于 O_3 生成[16] [17],而 26 日温度降低,最高温度低于 30°C。可见,高温低湿是臭氧持续污染的条件之一。

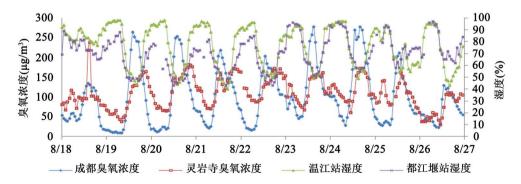


Figure 6. Diurnal variation of ozone and relative humidity in Chengdu City and Lingyan Temple 图 6. 成都市区和灵岩寺臭氧与相对湿度日变化

成都市区气压明显高于灵岩寺(图 7),这是由于灵岩寺海拔高于市区; O_3 浓度曲线与气压曲线呈负相关关系,气压降低, O_3 浓度上升。成都市区 O_3 浓度峰值出现超前于气压低值,灵岩寺 O_3 浓度峰值出现滞后于气压低值。从 18 日凌晨到 27 日凌晨,成都市区与灵岩寺气压整体呈上升趋势,而 O_3 污染出现了加强、维持、减弱三个过程,说明气压对臭氧污染的维持无明显影响。

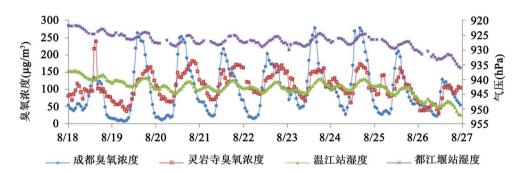


Figure 7. Diurnal variation of ozone and pressure in Chengdu City and Lingyan Temple 图 7. 成都市区和灵岩寺臭氧与气压日变化

已有研究表明,O₃浓度与降水呈负相关关系,在本次整个臭氧污染过程中,成都市区仅在 23 日晚间有一次短时强降水过程,灵岩寺仅在 23 日凌晨有一次短时强降水过程。分析每一次短时降水过程中臭氧浓度的变化可以看到,降水过程中臭氧浓度明显下降。总体而言,此次臭氧污染过程中几乎无降水,可见降水不利于臭氧污染的维持。

成都市区 O_3 持续污染期间,成都市区盛行风向为西风、西北风(图 8)。分析风向 O_3 浓度风玫瑰图,成都市区在偏南、偏西风向出现 O_3 浓度高值区,灵岩寺主要风向为东北风,有利于将东部城市地区的污染物向本站区域输送。分析说明,小风速、偏西风、偏南风是有利于成都市区臭氧污染的维持。

用白天每三小时云量观测资料与臭氧逐小时监测资料分析(图 9),污染过程期间白天平均云量 4成,在天空总云量多的时候,臭氧浓度低,随着天空总云量的减少臭氧浓度升高,两者呈现显著负相关。云量多阻挡太阳光,导致日照少,太阳直接辐射较小,减弱了臭氧前体物的光化学反应,不利于臭氧的产生。相反,天空云量少,就有利于臭氧浓度升高[18]。验证了晴到少云天气有利于臭氧污染的维持。

4.3. 持续臭氧污染期间的天气形势分析

从 500 hPa 环流形势(图 10(a))表明中高纬为多槽脊的纬向型环流,中低纬主要受西伸到我国内陆的 副热带高压控制,海南岛附近有一台风即将登陆。成都地区从 19 日起受副热带高压控制,在其控制下成 都市天气晴热,太阳辐射强烈,日照时间长,湿度小,无降水,大气热力和动力条件好,光化学反应充分(湍流混合充分),导致臭氧浓度超标。

700 hPa (图略)上 18 日到 25 日成都地区主要为偏南风,26 日 08 时河西走廊一带为偏北风,有冷空气进入四川盆地。850 hPa (图 10(b))四川盆地是一个暖中心,成都市处于反气旋环流西北部,有利于晴好天气维持,到25 日 20 时高空锋区逼近四川盆地,有冷空气即将入侵。从地面图看(图 10(c)),19 日到24日四川盆地有一低压中心,盆地为气流辐合区,到25 日 08 时地面冷锋逼近盆地,25 日 20 时冷空气已经进入四川盆地,将造成成都地区气温降低。低层大气气旋式辐合,将周边地区的污染物汇聚到盆地地区,造成了整个四川盆地一次区域性的臭氧污染,直到26 日冷空气入侵导致气温降低,且天空云量增多,臭氧前体物的光化学反应减弱,结束了持续7天的臭氧污染。

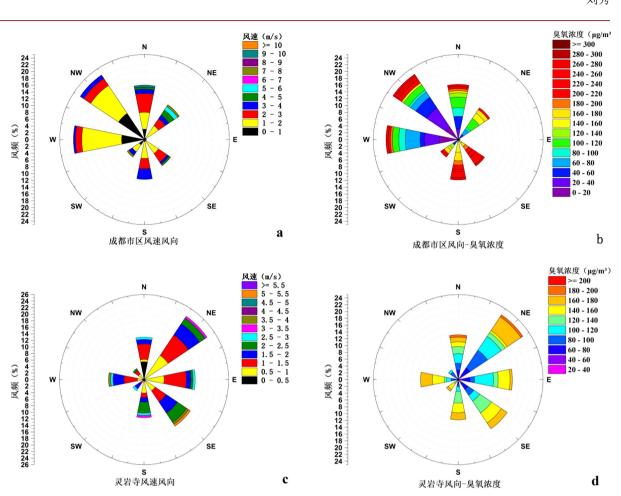


Figure 8. Wind speed and wind direction and ozone concentration rose map of Chengdu City and Lingyan Temple. (a): wind speed and wind direction map of Chengdu City, (b): wind concentration ozone concentration map of Chengdu City, (c): Fengyan Temple wind speed and wind direction map, (d): Lingyan Temple wind direction ozone concentration map 图 8. 成都市区和灵岩寺风速风向及臭氧浓度玫瑰图。(a): 成都市区风速风向图、(b): 成都市区风向臭氧浓度图、(c): 灵岩寺风速风向图、(d): 灵岩寺风向臭氧浓度图

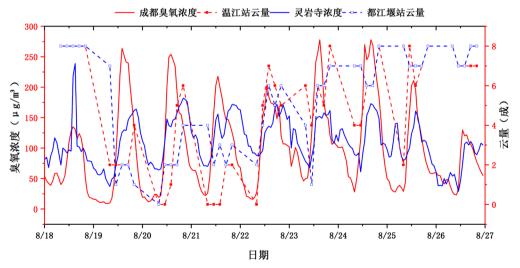


Figure 9. Relationship between total cloud amount and ozone concentration during the day 图 9. 白天总云量与臭氧浓度分布关系

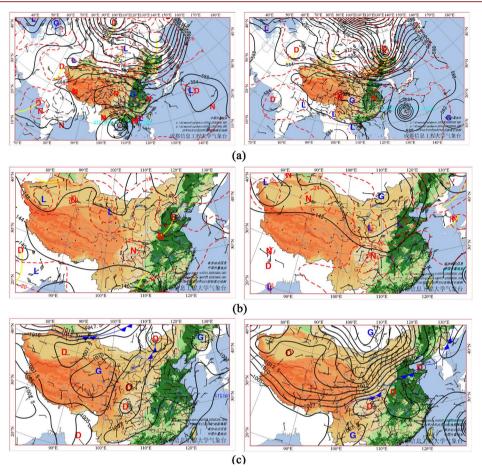


Figure 10. High-altitude and ground weather conditions during continuous ozone pollution. (a) Height field, temperature field, wind field at 08:00 on August 19 and 08:00 on August 25; (b) Height field, temperature field, wind field at 08:00 on August 19 and 20:00 on August 25; (c) eight field, temperature field, wind field at 08:00 on August 23 and 08:00 on August 25 图 10. 臭氧持续污染过程中高空和地面天气形势。(a) 8月19日08时和8月25日08时500 hPa高度场、温度场、风场; (b) 8月19日08时和8月25日08时和8月25日08时地面风场、海平面气压场

5. 结论

- 1) 成都地区臭氧污染和臭氧持续污染事件在春季和夏季均发生频次较高,7月臭氧污染最为严重, 其次为5月。
- 2) 持续污染过程中臭氧浓度与温度呈现明显的正相关关系,相关系数约为 0.76, 与向低湿度呈现负相关关系。持续高温、较低湿度、晴到少云天气、无降水、小风速、西风、西北风对成都市臭氧持续污染有利。臭氧浓度白天下午高,夜间低,城市清洁对照站点臭氧浓度峰值滞后于城区。
- 3) 夏季典型臭氧污染过程天气分析表明,四川盆地受西太平洋副热带高压的控制,天气晴好,有利于臭氧前体物进行光化学反应产生臭氧,再加上风速小,臭氧在水平方向上的扩散也受到抑制,导致了高温天气和臭氧持续污染事件的发生。

基金项目

成都信息工程大学本科教学工程项目(BKJX2019007, BKJX2019013, BKJX2019042, BKJX2019056, BKJX2019062, BKJX2019081, BKJX2019089, BKJX2019120 和 JY2018012)支持。

参考文献

- [1] 李莹,朱凌云,闫世明,张逢生.气象因素对太原夏季近地面臭氧浓度的影响[J]. 科技与创新,2016(18): 26-28.
- [2] Lia, K., Jacob, D.J., Liao, H., Shen, L., Zhang, Q. and Bates, K.H. (2019) Anthropogenic Drivers of 2013-2017 Trends in Summer Surface Ozone in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116, 422-427. https://doi.org/10.1073/pnas.1812168116
- [3] 徐家骝, 朱毓秀. 气象因子对近地面臭氧污染影响的研究[J]. 大气科学, 1994(6): 751-757.
- [4] 黄俊,廖碧婷,吴兑,王春林,蓝静,沈子琦,汤静,梁桂雄.广州近地面臭氧浓度特征及气象影响分析[J]. 环境科学学报,2018,38(1):23-31.
- [5] 吴锴, 康平, 王占山, 古珊, 帖心, 张莹, 文小航, 王思慧, 陈雨姿, 王莹, 陈迪. 成都市臭氧污染特征及气象成因研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4241-4252.
- [6] 徐锟、刘志红、何沐全、张娟、成都市夏季近地面臭氧污染气象特征[J]、中国环境监测, 2018, 34(5): 36-45.
- [7] 曹庭伟,吴锴,康平,文小航,李涵,王莹,吕欣远,李安琪,潘伟豪,范武波,易睿,包鑫斌,何沐全.成渝城市群臭氧污染特征及影响因素分析[J]. 环境科学学报,2018,38(4): 1275-1284.
- [8] 谢雨竹,潘月鹏,倪长健,陈志辉,韦霞.成都市区夏季大气污染物浓度时空变化特征分析[J].环境科学学报,2015,35(4):975-983.
- [9] 陈世俭, 童俊超, Kazuhiko KOBAYASHI, 朱建国. 气象因子对近地面层臭氧浓度的影响[J]. 华中师范大学学报 (自然科学版), 2005, 39(2): 273-277.
- [10] 刘源. 四川省大气污染概况及特点[J]. 重庆环境保护, 1986(2): 46-49.
- [11] 环境保护部. 环境空气质量指数(AQI)技术规定 HJ633-2012(试行)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [12] 胡子梅, 周国柱, 葛朝军, 王军. 蚌埠市臭氧污染评价及一次持续性污染过程分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(5): 1402-1411.
- [13] 刘姝岩,包云轩,金建平,刘诚,许建明,李建民,黄建平.重霾天气气溶胶辐射效应对近地面臭氧峰值的影响 [J]. 高原气象, 2018, 37(1): 296-304.
- [14] 贾海鹰, 李矛, 程兵芬, 王继康, 张永锋, 程念亮. 长沙市城区臭氧浓度特征研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(2): 168-173+199.
- [15] 姚青, 孙玫玲, 刘爱霞. 天津臭氧浓度与气象因素的相关性及其预测方法[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2206-2210.
- [16] Gallimore, P.J., Achakulwisut, P., Pope, F.D., Davies, J.F., Spring, D.R. and Kalberer, M. (2011) Importance of Relative Humidity in the Oxidative Ageing of Organic Aerosols: Case Study of the Ozonolysis of Maleic Acid Aerosol. Atmospheric Chemistry and Physics, 11, 12181-12195. https://doi.org/10.5194/acp-11-12181-2011
- [17] 陈漾, 张金谱, 黄祖照. 广州市近地面臭氧时空变化及其与气象因子的关系[J]. 中国环境监测, 2017, 33(4): 99-109.
- [18] 王宏, 陈晓秋, 余永江, 林长城, 白亮. 福州近地层臭氧分布及其与气象要素的相关性[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(4): 175-181.