

成都秋季大气污染过程 VOCs 特征及 SOA 生成潜势

何 丽¹, 罗萌萌¹, 潘 巍¹, 韩 丽², 程 琰^{1*}, 陈军辉² (1.西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610036; 2.四川省环境保护科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 利用在线气相色谱-质谱(GC-FID/MS)监测系统,对成都市城区秋季典型大气污染期间环境空气中的 77 种挥发性有机物(VOCs)进行连续监测,分析了污染前期、污染中期、污染后期 VOCs 的污染特征、日变化规律.结果表明,成都市城区典型污染前期 VOCs 体积分数为 38.9×10^{-9} ;污染中期 VOCs 体积分数迅速增加,比污染前期高 3.7 倍,达到 143.4×10^{-9} ,污染后期 VOCs 体积分数为 35.7×10^{-9} .污染前期 VOCs 日变化不明显,污染中期、后期 VOCs 日变化呈双峰性,分别出现在每天车流量高峰时段.此外,利用气溶胶生成系数(FAC)评估了不同污染阶段 VOCs 对二次有机气溶胶(SOA)的生成潜势,污染前期、污染中期、污染后期 SOA 浓度值分别为 1.1, 3.1, $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$,芳香烃是 SOA 的主要前体物.

关键词: 挥发性有机物; 污染特征; 日变化; 二次有机气溶胶

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2018)08-2840-06

Characteristics and forming potential of secondary organic aerosols of volatile organic compounds during an air pollution episode in autumn Chengdu. HE Li¹, LUO Meng-meng¹, PAN Wei¹, HAN Li², CHENG Yan^{1*}, CHEN Jun-hui² (1.Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610036, China; 2.Sichuan Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610041, China). *China Environmental Science*, 2018,38(8): 2840-2845

Abstract: The pollution characteristics and diurnal variation of 77 ambient volatile organic compounds (VOCs) were studied by using online gas chromatography mass spectrometry detection systems (GC-FID/MS) during a typical air pollution episode from Oct. 28th to Nov. 9th, 2016 in Chengdu city. The results showed that the averaged concentration of VOCs dramatically increased from 38.9×10^{-9} before the episode to 143.4×10^{-9} in the episode. After the episode, the averaged concentration of VOCs was 35.7×10^{-9} . There was no obvious bimodal distribution of VOCs in the pre-pollution period, afterwards the diurnal variation curve of VOCs concentration had a bimodal characteristic, with the two peaks appearing in the rush hours with heavy traffic. The potential formation of secondary organic aerosols (SOA) estimated by fractional aerosol coefficients (FAC) and the SOA concentration values in various stages were $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (before the episode), $3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (in the episode) and $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (after the episode), respectively. Alkanes were found to be the main contributors to the SOA formations.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); pollution characteristics; diurnal variation; secondary organic aerosol (SOA)

近年来,我国大气污染形势严峻,以城市光化学烟雾和灰霾等复合型大气污染为主的区域性大气环境问题日益突出^[1-2].挥发性有机物(VOCs)主要包括烷烃类、烯烃类、芳香烃类、卤烃类、含氧化合物、含氮化合物、含硫化合物.相关研究表明,中国 VOCs 排放量呈逐年上升的趋势,醇类、酯类、醚类和卤代烃的排放量增长最快^[3].预计到 2020 年,非甲烷总烃(NMVOCs)排放量将从 1990 年的 111kt 增长至 182kt^[4].VOCs 作为臭氧(O₃)和二次有机气溶胶(SOA)的重要前体物^[5-7],对大气污染的形成至关重要.同时大多数 VOCs 具有较强的毒性及致癌性,对人体健康具有潜在危害^[8-9].因此研究环境空气中的 VOCs 特征对于保护人体健康和生态环境有着重要的意义.

北京^[10-12]、天津^[13]、深圳^[14]、南京^[15-16]、上海^[17]

等地针对 VOCs 污染特征及其 SOA 生成影响已开展了大量的研究工作.刘丹等^[18]研究发现北京冬季雾霾频发期 VOCs 物质组分明增多且浓度变大.王红丽等^[19]研究了上海市光化学污染期间 VOCs 污染特征,结果显示不利的气象条件、机动车排放、溶剂挥发等工业排放是导致 VOCs 浓度上升的主要原因.邹宇等^[20]对广州番禺典型污染过程的研究发现,VOCs 和 NO_x 浓度的上升导致 O₃ 浓度升高,加速 VOCs 氧化产生 SOA,进一步引起能见度的恶化.甲苯、乙苯、间/对二甲苯、高碳烷烃如十一烷等是对 SOA 生成贡献大的物种^[21].

收稿日期: 2018-01-08

基金项目: 四川省挥发性有机物全口径摸底调查工作(四川省环境保护专项课题)

* 责任作者,副教授,chengyan@swjtu.edu.cn

成都地处四川盆地西部,作为西南地区的重要中心城市,经济发展迅猛,然而能源消耗和污染物大量排放加剧成都及周边地区空气质量恶化.目前成都市典型大气污染条件下的 VOCs 污染特征及其 SOA 生成影响的研究相对缺乏.本研究通过对成都市武侯区人民南路站点空气重污染前后(2016 年 10 月 28 日~11 月 9 日)VOCs 变化特征进行分析,并结合气溶胶生成系数(FAC)分析了 SOA 生成潜势,以期对成都地区大气污染的控制提供一定的参考依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

监测点位于四川省环境保护科学研究院楼顶(离地面约 35m),距离楼顶面约 4m.该点位于成都市武侯区中心区域,周围有 3 条主干道,周围是居民生活区和商业区.环境空气自动监测站的常年监测数据表明,该采样点的监测数据能较好地反映成都市城区的大气污染状况.

采用 TH-PKU 300B 大气挥发性有机物快速在线监测系统(武汉天虹,中国).该系统采用双气路同时采样:环境空气样首先经过 Teflon 颗粒物过滤器,再分两路同时进入冷冻预浓缩系统,去除 CO_2 和水的干扰并保证目标化合物完全捕集.分析仪器为气相色谱/单四级杆质谱联用仪(美国 Agilent 7890B-5977A),其中一路样品经过 PLOT Al_2O_3 色谱柱后被 FID 检测器检测 $\text{C}_2\sim\text{C}_5$ 化合物;另一路经过 Agilent DB-624 色谱柱后被 MSD 检测器检测 $\text{C}_6\sim\text{C}_{12}$ 化合物.该系统每 1h 采集 1 次空气样品,采样流量为 60mL/min,采样时长为 5min.

为保证观测数据的有效性和可靠性,在监测前用美国国家环境保护署(EPA)认可的 O_3 前体物标准光化学气体(PAMS)和 TO-15 标准气体采用 5 点标准法作不同体积分数梯度的标准曲线,相关系数均在 0.998 以上,内标校准物质为溴氯甲烷,1,4-二氟苯,氯苯-D5 和 4-溴氟苯;并在每天 0:00 进 4×10^{-9} 的 PAMS 标准气体,通过单点校准外标数据对每天的数据进行峰窗漂移校准.

1.2 SOA 生成潜势计算方法

本研究采用 FAC 法,估算 SOA 生成潜势^[22-23].按 Grosjean^[22]等的假设:即 SOA 的生成只在白天

(8:00~17:00)发生,且 VOCs 只与 $\cdot\text{OH}$ 发生反应生成 SOA, SOA 生成潜势估算公式如下:

$$\text{SOA}_p = \text{VOCst} / (1 - \text{Fvoc}) \times \text{FAC} \quad (1)$$

式中: SOA_p 是 SOA 生成的潜势, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; VOCst 是环境中某种 VOCs 的质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Fvoc 是该种 VOCs 物种中参与反应的分数,%; FAC 是 SOA 的生成系数, %.

$$\text{VOCst} = C_i \times M_i / 22.4 \quad (2)$$

式中: C_i 是某种 VOCs 物种的环境体积分数, $\times 10^{-9}$; M_i 是该种 VOCs 物种的分子量.

2 结果与讨论

2016 年 10 月 28 日~11 月 9 日期间根据成都市环境保护局(<http://www.cdepb.gov.cn>)发布的环境空气质量日报显示:10 月 28 日~11 月 1 日空气质量为良,11 月 2 日~6 日空气质量为中、重度污染,11 月 7 日~9 日空气质量为良.本研究将 10 月 28 日~11 月 1 日定为污染前期,11 月 2 日~11 月 6 日为污染中期,11 月 7 日~11 月 9 日为污染后期.

2.1 气象条件

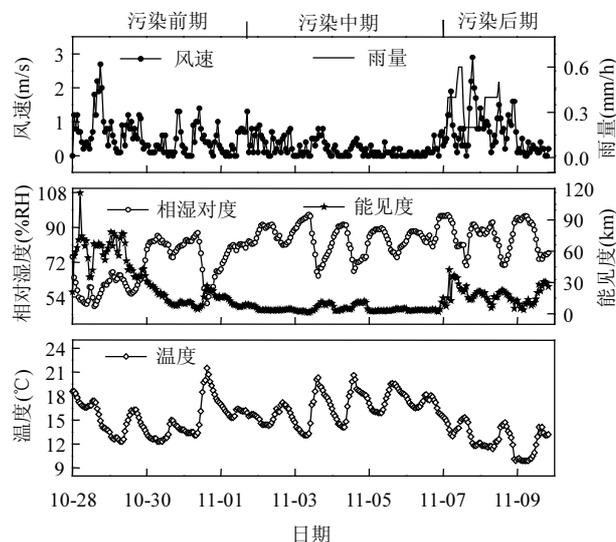


图 1 监测期间水平能见度、相对湿度、大气温度、风速和降雨时间序列变化

Fig.1 Time series of horizontal visibility, relative humidity, temperature, wind speed and rainfall during monitoring periods

如图 1 所示,在污染中期能见度和风速都显著降低,温度和相对湿度较污染前期有所上升.污染前期平均风速为 0.5m/s,而污染中期静风频率高且平

均风速仅为 0.2m/s;污染后期出现短暂降雨,降雨从 11 月 7 日晚上 0:00 开始持续到 8 日下午 1:00 结束,降雨期间平均风速为 0.9m/s,利于污染物的传输和稀释,空气质量明显改善.本次污染过程与气象因素有一定关系.

2.2 VOCs 污染水平

监测期间共测得 77 种挥发性有机物,其中烷烃 27 种,烯烃 10 种,炔烃 1 种(乙炔),芳香烃 14 种,卤代烃 25 种.图 2、图 3 是监测期间环境空气中 VOCs 和 PM_{2.5} 的逐时变化状况,可以看出在污染前期 VOCs 平均体积分数为 38.9×10^{-9} ,11 月 2 日 VOCs 浓度迅速上升,在 10:00 达到小时峰值 143.4×10^{-9} ;污染中期 VOCs 浓度维持较高水平,平均体积分数为 81.1×10^{-9} ;污染后期迅速下降为 35.7×10^{-9} .从物种分类上看,各物种均出现较为一致的变化过程.不同阶段 PM_{2.5} 的浓度分别为污染前期 $43.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、污染中期 $118.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、污染后期 $35.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. VOCs 和 PM_{2.5} 浓度呈现显著的正相关性.

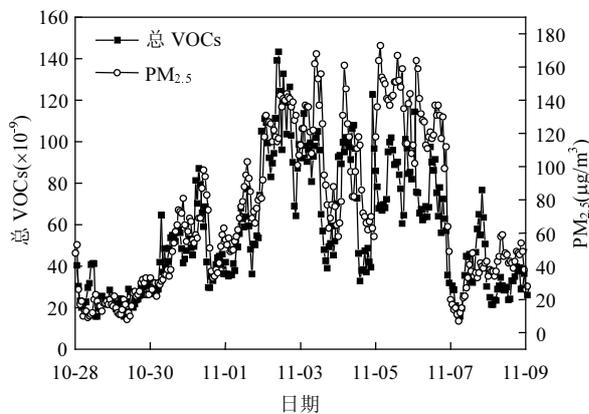


图 2 监测期间 VOCs、PM_{2.5} 时间变化序列

Fig.2 Time series of VOCs and PM_{2.5} during monitoring periods

如图 4,总体而言,烷烃占比最大,为 54.5%,其次是烯烃 14.7%和芳香烃 14.1%,炔烃为 10.6%,卤代烃最小为 6.0%.污染前期、中期各组分占比表现一致,均为烷烃>烯烃>芳香烃>炔烃>卤代烃,而污染后期则表现为烷烃>芳香烃>烯烃>炔烃>卤代烃,造成这一差异的原因可能为污染后期 11 月 7 日 17:00~22:00 间芳香烃浓度异常升高为 20.5×10^{-9} .芳香烃主要来源于机动车尾气排放以及工业排放如溶剂和涂料使用、石油化工等.污染前、中期间主导风向均

为东北风,而污染后期主导风向为西南风.西南方向距离采样点约 9km 处有武侯工业园区(主要为制鞋业和机械电子产业等),13km 处有双流区西南航空港经济开发区(工业园区主要为机械、电子电器、生物医药等工业企业),可能受周边工业源排放的影响.

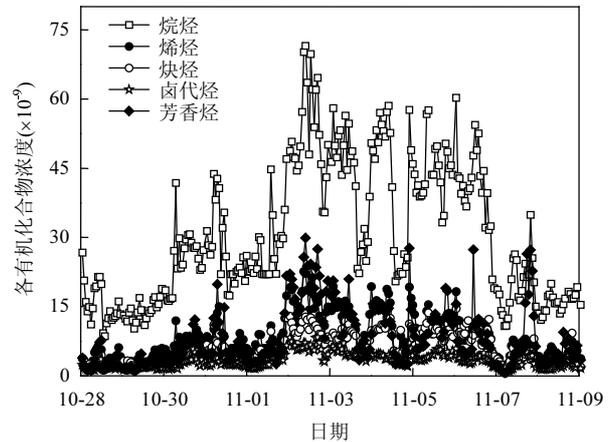


图 3 监测期间烷烃、烯烃、炔烃、卤代烃和芳香烃时间序列变化

Fig.3 Time series of alkanes, alkenes, alkyne, halocarbons and aromatics during monitoring periods

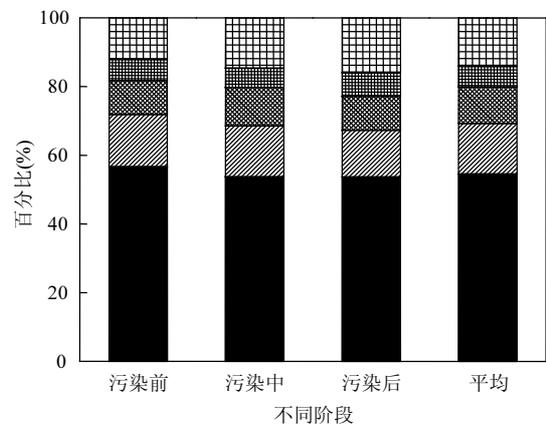


图 4 不同阶段环境中烷烃、烯烃、炔烃、卤代烃和芳香烃百分比

Fig.4 The percentage of alkanes, alkenes, alkyne, halocarbons and aromatics at various stages

■ 烷烃 ▨ 烯烃 ▩ 炔烃 ▪ 芳香烃 ▫ 卤代烃

图 5 中,不同阶段主要物种基本一致,约占总 VOCs 的 80%.成都地区 VOCs 的优势物种主要为 C₂~C₄ 的烷烃、烯烃、乙炔和苯系物等,这与国内其他城市研究的结论基本一致^[24-26].研究表明城市地区丙烷、正丁烷和异丁烷的主要来源为液化石油气(LPG)的使用,异戊烷是汽油挥发和汽油车尾气

的特征物质^[27].乙炔平均浓度为 5.5×10^{-9} ,仅次于乙烷,空气中的乙炔主要来源于汽油车尾气排放以及生物质的燃烧^[28].甲苯和苯浓度变化最大,污染中期甲苯(4.2×10^{-9})和苯(3.3×10^{-9})浓度分别为污染前期的 2.7 倍、2.6 倍,为污染后期的 2.6 倍、2.3 倍.苯的光化学活性低于甲苯,可用苯与甲苯的比值(B/T)衡量 VOCs 污染来源特征.B/T 比值大于 0.5^[29],表示主要为机动车尾气排放,反之可能是受溶剂使用、工艺过程等影响.本研究中污染前期、中期、后期 B/T 比值分别为 0.99、0.67、0.51,表明 VOCs 的排放源主要为机动车,但机动车的排放贡献逐渐减弱.此外,成都市大气中卤代烃主要为二氯甲烷和氯甲烷,二氯甲烷主要来源于周边地区居民日常生活以及工业生产过程中有机溶剂的挥发,氯甲烷是生物质燃烧的特征物种^[27].综上所述,成都市环境空气中的 VOCs 主要来源于机动车尾气排放,溶剂挥发、工业工程及生物质燃烧也有一定影响.

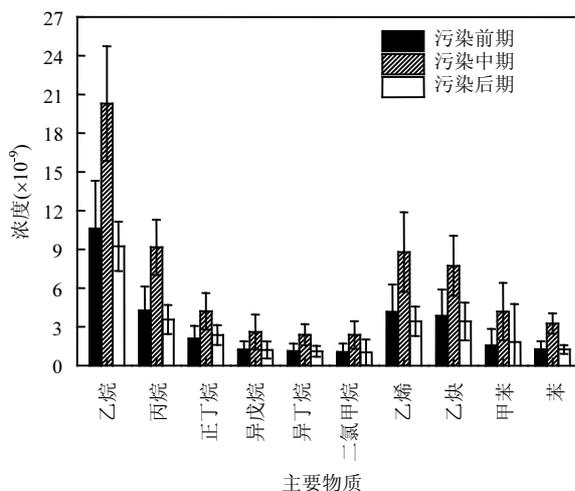


图 5 不同阶段环境空气中主要 VOCs 物种浓度

Fig.5 Main components of VOCs observed in Chengdu at various stages

2.3 VOCs 日变化

污染物来源和气象条件等因素的变化均会对环境空气中的痕量气体有较明显的影响.由图 6 可看出, VOCs 日变化在污染前期呈现 3 峰分布,污染中、后期呈双峰分布; O_3 日变化在污染前期、中期均呈单峰分布,污染后期为双峰分布;而 NO_x 日变化在不同阶段均呈双峰分布.上午 8:00 和下午 5:00 左右汽车逐渐增多, VOCs 和 NO_x 体积分数升高,受汽车尾气排放影响明显;中午 12:00 后,太阳辐射增

强、温度升高,易发生光化学反应,导致 VOCs 和 NO_x 转化为 O_3 ;晚上大气边界层高度低,不利于污染物的稀释扩散,同时局地排放会导致污染物体积分数的积累.

不同阶段环境中 O_3 的体积分数分别为污染前期 $44.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 污染中期 $25.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 污染后期 $32.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. O_3 的形成受 VOCs 和 NO_x 共同影响,研究表明 $VOCs/NO_x < 8$,表示为 VOCs 敏感型,反之则为 NO_x 敏感型^[31].污染前期、中期、后期任意时刻 $VOCs/NO_x$ 比值均小于 8,表明本研究中 O_3 的形成主要受 VOCs 控制.同时相关研究表明高温低湿的环境更有利于 VOCs 和 NO_x 生成 O_3 ^[32].从图 6 中可看出,污染前期 VOCs 日变化不明显,光化学反应较弱, VOCs 浓度出现持续积累过程.污染中期由于大气温度上升,尤其是 12:00~18:00 期间,大气温度分别高于污染前期 2°C 、污染后期 4°C , VOCs 的光化学反应强烈.污染后期由于降雨等因素,环境湿度增大,大气温度降低,不利于 VOCs 的光化学反应.

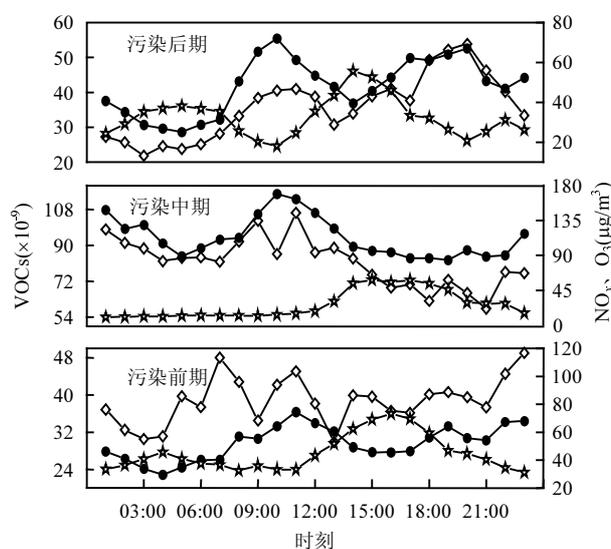


图 6 不同阶段 VOCs、 NO_x 、 O_3 的日变化

Fig.6 Study on diurnal variation of VOCs, NO_x and O_3 at various stages

◇ VOC ● NO_x ★ O_3

2.4 二次有机气溶胶生成潜势分析

本研究中的 77 个 VOCs 物种对 SOA 具有生成潜势的共有 24 个,其中烷烃类 11 个物种,芳香烃类 13 个物种,见表 1.不同阶段 SOA 的生成潜势分别为污染前期 $1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$,其中烷烃占比为 10.6%,芳香烃占比为 89.4%;污染中期 $3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$,其中烷烃占比为

9.2%,芳香烃占比为 90.8%;污染后期 $1.5\mu\text{g}/\text{m}^3$.其中烷烃占比为 7.5%,芳香烃占比为 92.5%.污染前、中、后期芳香烃占 SOA 生成比例明显增大.烷烃中 SOA 生成贡献最大的是正己烷、甲基环己烷、正壬烷等,而芳香烃中则主要为甲苯、间/对二甲苯、乙苯、邻二甲苯、苯等.可见芳香烃中苯系物是生成 SOA 的绝对优势物种.

表 1 成都市 VOCs 对 SOA 的生成潜势

Table 1 Potential formation of VOCs to SOA in Chengdu

类别	物种	SOA($\times 100\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
		污染前期	污染中期	污染后期
烷烃	甲基环戊烷	0.10	0.21	0.08
	环己烷	0.09	0.17	0.10
	正庚烷	0.02	0.05	0.02
	甲基环己烷	1.93	6.00	2.82
	2-甲基庚烷	0.07	0.12	0.10
	3-甲基庚烷	0.07	0.12	0.11
	辛烷	0.02	0.04	0.05
	正壬烷	0.66	1.24	0.53
	正癸烷	0.36	0.61	0.27
	正己烷	8.76	19.13	7.14
	2,2,4-三甲基戊烷	0.39	0.73	0.30
	苯	9.78	18.45	6.12
	甲苯	39.13	105.47	59.77
芳香烃	乙苯	14.33	38.32	20.65
	间/对二甲苯	28.96	87.66	41.13
	邻二甲苯	8.18	24.06	11.94
	异丙苯	0.36	0.52	0.08
	正丙基苯	0.28	0.32	0.18
	3-乙基甲苯	1.62	3.12	1.41
	4-乙基甲苯	0.51	0.61	0.31
	1,3,5-三甲基苯	0.71	1.10	0.20
	2-乙基甲苯	0.89	1.16	0.63
	1,2,4-三甲基苯	0.30	0.92	0.34
1,2,3-三甲基苯	0.03	0.23	0.00	
合计	117.58	310.36	154.29	

3 结论

3.1 2016年10月28日~11月9日成都市出现一次典型大气污染过程,污染前期 VOCs 平均体积分数为 38.9×10^{-9} ,污染中期 VOCs 浓度迅速上升,平均体积分数为 81.1×10^{-9} ,污染后期 VOCs 平均体积分数为 35.7×10^{-9} .污染后期在西南风的影响下可能出现区域污染物的传输,芳香烃占比增大.

3.2 成都市城区 VOCs 主要受机动车尾气排放影响,溶剂使用、工业过程和生物质燃烧也有一定影响,并且机动车排放源的贡献在污染前、中、后期呈逐

渐减弱的趋势.

3.3 污染前期 VOCs 日变化不明显,光化学反应较弱,出现持续积累过程;污染中期 VOCs 的光化学反应强烈;污染后期由于降雨等因素,环境湿度增大,大气温度降低,但不利于 VOCs 的光化学反应.

3.4 成都市城区不同阶段 SOA 的生成量为污染前期 $1.2\mu\text{g}/\text{m}^3$,污染中期 $3.1\mu\text{g}/\text{m}^3$,污染后期 $1.5\mu\text{g}/\text{m}^3$.烷烃中 SOA 生成贡献最大的是正己烷、甲基环己烷等,而芳香烃中则主要为甲苯、间/对二甲苯、乙苯、邻二甲苯、苯等.

参考文献:

- [1] Shi Y C. Frog Haze Production Mechanism & Treatment Strategy in China [J]. Shaanxi Electric Power, 2013,41(4):1-4.
- [2] Wang X P, Mauzerall D L. Characterizing distributions of surface ozone and its impact on grain production in China, Japan and South Korea: 1990 and 2020 [J]. Atmospheric Environment, 2004,38(26):4383-4402.
- [3] Wei W, WANG S X, HAO J M, et al. Trends of chemical speciation profiles of anthropogenic volatile organic compounds emissions in China, 2005-2020 [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2014,8(1):27-41.
- [4] Klimont Z, Streets D G, Gupta S, et al. Anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds in China [J]. Atmospheric Environment, 2002,36(8):1309-1322.
- [5] Shao M, Zhang Y, Zeng L, et al. Ground-level ozone in the Pearl River Delta and the roles of VOC and NO_x in its production [J]. Journal of Environmental Management, 2009,90(1):512-518.
- [6] Yuan B, Hu W W, Shao M, et al. VOC emissions, evolutions and contributions to SOA formation at a receptor site in Eastern China [J]. Atmospheric Chemistry & Physics Discussions, 2013,13(17):8815-8832.
- [7] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. Atmospheric Environment, 2000,34(12-14):2063-2101.
- [8] 周裕敏,郝郑平,王海林.北京城乡结合地空气中挥发性有机物健康风险评估 [J]. 环境科学, 2011,32(12):3566-3570.
- [9] USEPA (United States Environmental Protection Agency). Carcinogenic effects of benzene: anupdate [R]. Washington: Prepared by the National Center for Environmental Health, Office of Research and Development, 2002.
- [10] 吕子峰,郝吉明,段菁春,等.北京市夏季二次有机气溶胶生成潜势的估算 [J]. 环境科学, 2009,30(4):969-975.
- [11] 胡春芳,田媛,李科.北京市春季不同雾霾天挥发性有机物特征研究 [J]. 广东化工, 2017,44(21):127-128.
- [12] 刘奇琛,黄婧,郭新彪.北京市大气挥发性有机物(VOCs)的污染特征及来源 [J]. 生态毒理学报, 2017,12(3):49-61.
- [13] 于艳,王秀艳,杨文.天津市机动车二次有机气溶胶生成潜势的估算 [J]. 中国环境科学, 2015,35(2):381-386.
- [14] 王扶藩,朱乔,冯凝,等.深圳大气中 VOCs 的二次有机气溶胶生成潜势 [J]. 中国环境科学, 2014,34(10):2449-2457.

- [15] 杨笑笑,汤莉莉,胡丙鑫,等.南京城区夏季大气 VOCs 的来源及对 SOA 的生成研究——以亚青和青奥期间为例 [J]. 中国环境科学, 2016,36(10):2896-2902.
- [16] 林 旭,朱 彬,安俊琳,等.南京北郊 VOCs 对臭氧和二次有机气溶胶潜在贡献的研究 [J]. 中国环境科学, 2015,35(4):976-986.
- [17] 王 倩,陈长虹,王红丽,等.上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究 [J]. 环境科学, 2013,34(2):424-433.
- [18] 刘 丹,解 强,张 鑫,等.北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价 [J]. 环境科学, 2016,37(10):3693-3701.
- [19] 王红丽.上海市光化学污染期间挥发性有机物的组成特征及其对臭氧生成的影响研究 [J]. 环境科学学报, 2015,35(6):1603-1611.
- [20] 邹 宇,邓雪娇,李 菲,等.广州番禺大气成分站复合污染过程 VOCs 对 O₃ 与 SOA 的生成潜势 [J]. 环境科学, 2017,38(6):2246-2255.
- [21] 崔虎雄.上海市春季臭氧和二次有机气溶胶生成潜势的估算 [J]. 环境科学, 2013,34(12):4529-4534.
- [22] Grosjean D, Seinfeld J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosol [J]. Atmospheric Environment, 1989, 23(8):1733-1747.
- [23] Grosjean D. In situ organic aerosol formation during a smog episode: Estimated production and chemical functionality [J]. Atmospheric Environment, 1992,26(6):953-963.
- [24] 李用宇,朱 彬,安俊琳,等.南京北郊秋季 VOCs 及其光化学特征观测研究 [J]. 环境科学, 2013,34(8):2933-2942.
- [25] 崔虎雄,吴迺名,高 松,等.上海城区典型污染过程 VOCs 特征及臭氧潜势分析 [J]. 环境科学, 2011,32(12):3537-3542.
- [26] 王 琴,刘保献,张大伟,等.北京市大气 VOCs 的时空分布特征及化学反应活性 [J]. 中国环境科学, 2017,37(10):3636-3646.
- [27] 解 鑫,邵 敏,刘 莹,等.大气挥发性有机物的日变化特征及在臭氧生成中的作用——以广州夏季为例 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(1):54-62.
- [28] 刘 莹.北京和珠江三角洲大气挥发性有机物活性和来源研究 [D]. 北京:北京大学, 2007.
- [29] Nelson P F, Quigley S M. The hydrocarbon composition of exhaust emitted from gasoline fuelled vehicles [J]. Atmospheric Environment, 1984,18(1):79-87.
- [30] 刘 全,王跃思,吴方堃,等.长沙大气中 VOCs 研究 [J]. 环境科学, 2011,32(12):3543-3548.
- [31] Seinfeld J H. Urban air pollution: state of the science [J]. Science, 1989,243(4892):745-752.
- [32] 刘 建,吴 兑,范绍佳,等.前体物与气象因子对珠江三角洲臭氧污染的影响 [J]. 中国环境科学, 2017,37(3):813-820.
- [33] 黄 俊,廖碧婷,吴 兑,等.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(01):23-31.

作者简介: 何 丽(1993-),女,四川南充人,西南交通大学地球科学与环境工程学院硕士研究生,主要从事大气污染控制研究.发表论文 1 篇.