

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2020041501

韩桥, 何向东, 王明仕, 等. 安庆市城区春季挥发性有机物组成特征及大气反应活性[J]. 环境化学, 2021, 40(8): 2473-2480.

HAN Qiao, HE Xiangdong, WANG Mingshi, et al. Composition characteristics and atmospheric reactivity of volatile organic compounds in Anqing City in spring [J]. Environmental Chemistry, 2021, 40 (8): 2473-2480.

安庆市城区春季挥发性有机物组成特征及大气反应活性*

韩 桥 何向东 王明仕** 何予川 刘 洋

(河南理工大学资源环境学院, 焦作, 454003)

摘 要 本研究基于2019年5月在安庆市城区离线采集大气中VOCs样品获取的监测结果, 分析了安庆市城区大气中VOCs的污染特征、化学反应活性及与二次气溶胶生成之间的关系. 结果表明, 2019年5月安庆市城区大气VOCs日均体积分数范围为 18.56×10^{-9} — 25.05×10^{-9} , 均值为 22.53×10^{-9} , 烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃占比分别为52.40%、20.81%、16.90%和9.89%. C_2 — C_5 的烷烃、乙烯、丙烯、甲苯和苯是含量最丰富的组分. 甲苯/苯(T/B)均值为1.67, 表明安庆市城区大气VOCs符合机动车尾气为主要贡献源的特征. 乙烷/乙炔(E/E)均值为0.49, 表明采样区域大气老化程度较轻, 受本地污染排放影响较大. 利用·OH消耗速率(L^{OH})和臭氧生成潜势(OFP)评估了大气VOCs的反应活性, 安庆市城区大气VOCs中烯烃活性最高, 对 L^{OH} 和OFP的贡献依次为67.08%和69.80%, 丙烯、乙烯、正丁烯、乙炔等是安庆市大气VOCs的关键活性组分. 利用气溶胶生成系数法(FAC)估算了大气中VOCs的二次气溶胶生成潜势, 芳香烃对SOA的贡献率最大, 高达94.09%, 甲苯、苯和间/对二甲苯等是对SOA生成贡献较大的组分.

关键词 挥发性有机物, 反应活性, 污染特征, 安庆市.

Composition characteristics and atmospheric reactivity of volatile organic compounds in Anqing City in spring

HAN Qiao HE Xiangdong WANG Mingshi** HE Yuchuan LIU Yang

(School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, 454003, China)

Abstract In this study, the volatile organic compounds (VOCs) samples in the atmosphere were collected offline in Anqing city in May 2019 to analyze the pollution characteristics and the chemical reactivity of VOCs. The relationships between VOCs and the formation of the secondary aerosol were analysed. The results showed that the daily average volume fraction of VOCs in Anqing ranged from 18.56×10^{-9} to 25.05×10^{-9} with an average value of 22.53×10^{-9} . Alkanes, olefins, alkynes and aromatic hydrocarbons accounted for 52.40%, 20.81%, 16.90% and 9.89% of the total VOCs, respectively. Alkanes (C_2 — C_5), ethylene, propylene, toluene and benzene were the most predominant components. The average value of toluene / benzene (T/B) was 1.67, indicating that atmospheric VOCs pollution in Anqing were mainly affected by vehicle exhausts. The average value of ethane / acetylene (E/E) was 0.49, which showed that the aging degree of atmosphere in the sampling area

2020年4月15日收稿(Received: April 15, 2020).

* 河南省高等学校重点科研项目(16A170001)和河南省高校基本科研业务费专项(NSFRF1631)资助.

Supported by the Key Scientific Research Projects of Henan Universities (16A170001) and Funds for Basic Scientific Research Business of Henan Universities (NSFRF1631).

** 通讯联系人 **Corresponding author**, Tel: 0391-3987998, E-mail: mingshiwang@hpu.edu.cn

was relatively low, which was greatly affected by local pollution emissions. $\cdot\text{OH}$ depletion rate (L^{OH}) and ozone formation potential (OFP) was adapted to evaluate the reactivity of atmospheric VOCs. The results indicated that olefin activity of atmospheric VOCs in Anqing was the highest, which contributed 67.1% to the L^{OH} and 69.8% to the ORP. Propylene, ethylene, n-butene and acetylene were the main active components of atmospheric VOCs in Anqing. The secondary aerosol generation potential of VOCs in the atmosphere was estimated by using the aerosol generation coefficient method (FAC). The contribution rate of aromatic hydrocarbons to SOA was the highest, which was up to 94.09%. Toluene, benzene and *m/p*-xylene were the most important components to the formation of SOA.

Keywords volatile organic compounds, reactivity, pollution characteristics, Anqing City.

近年来,随着我国大气污染防治工作的逐步推进,全国范围内环境空气质量总体改善.与2017年相比,2018年我国大部分城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO 、 CO_x 和 SO_2 等污染物浓度和超标天数均下降,而 O_3 浓度和超标天数比例均增加,臭氧污染问题逐渐凸显^[1].VOCs可以和氮氧化物发生光化学反应形成光化学烟雾,也可与大气环境中的氢氧自由基、硝酸自由基、臭氧等氧化剂发生多途径反应,生成二次有机气溶胶,对环境空气中的臭氧和 $\text{PM}_{2.5}$ 有重要影响,直接或间接的影响着人体健康和环境空气质量^[2-3].基于 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染的协同调控已成为我国在大气污染防治方面亟需解决的关键问题,从VOCs污染特征着手直接分析其对臭氧生成与影响的研究十分必要.

目前,国内已开展了大量关于VOCs的浓度水平、污染特征、化学反应活性和污染物来源等研究,如北京^[4-5]、上海^[6]、南京^[7]、天津^[8]、郑州^[9]、合肥^[10]等地.安庆市位于长江中下游北岸,是安徽省西南部重要的工业城市.随着安庆市经济的快速发展,能源消耗持续上升,大气污染问题频发.据安庆市环境质量公报显示,2018年安庆市环境空气质量优良率只有77%,首要污染物以 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 为主,分别占144 d和116 d.VOCs是臭氧和二次有机气溶胶产生的重要前体物,但目前尚未见到研究安庆市大气中VOCs的相关报道.

本研究于2019年5月对安庆市城区大气VOCs开展了为期1周的定点离线观测,分析VOCs的浓度水平和组分特征,估算VOCs的化学反应活性,筛选出VOCs关键活性组分,以为安庆市大气污染防治提供科学支撑.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 样品采集

本研究采样点位于安庆市环境空气国控监测点马山宾馆西北侧200 m处的吾家宾馆楼顶($30^{\circ}31'\text{N}$, $117^{\circ}2'\text{E}$),测点离地高度约21 m.该点位地处安庆市城区,周边分布着商业区、居民区和政府机关等,监测数据能基本反映安庆市城区的污染状况.观测时段为2019年5月15日—5月21日,连续监测1周.样品采集使用抽真空的SUMMA罐,采样罐容积为6 L,采样流量 $3.8\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,采样时间为当天10:00—次日10:00,采集完成后避光室温保存,确保10 d内完成分析.

1.2 样品分析

通过预浓缩仪(Entech 7100 预浓缩仪)和气相色谱质谱联用仪(Agilent 7890 A/5975C 气相色谱质谱联用仪)完成样品分析.将VOCs样品进样400 mL,通过预浓缩仪的三级冷阱处理.在预浓缩仪中,一级冷阱捕集温度设定为 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$,捕集流速为 $90\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,解析温度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$;二级冷阱捕集温度设定为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,捕集流速为 $90\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,解析温度为 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$;三级聚焦温度设定为 $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$,烘烤温度为 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$.预浓缩处理后的样品进入气相色谱仪进行分离,设置起始温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,5 min后,以 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 速度升温至 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持6 min后,将温度以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 速度升至 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持4 min,随后进入检测器(MS+FID)进行检测.质谱仪采用全扫描方式进行扫描.

样品的采集与分析的全过程参照《环境空气 挥发性有机物的测定 罐采样/气相色谱-质谱法》(HJ

759—2015)和《臭氧前体物采样和分析技术支持文件》(EPA/600-R-98/161)等进行,严格按照标准方法的要求,注重质量保证与质量控制。

1.3 数据分析方法

1.3.1 ·OH 自由基消耗速率

·OH 自由基是对流层大气中最重要的氧化剂,·OH 自由基反应活性将所有 VOCs 组分置于同一基点上比较它们的活性,·OH 自由基消耗速率可以反映 VOCs 中各组分对光化学反应的相对贡献,其计算公式如下:

$$L_i^{\text{OH}} = [\text{VOC}]_i \times K_i^{\text{OH}} \quad (1)$$

式中, L_i^{OH} 为 VOCs 中组分 i 的·OH 自由基消耗速率, s^{-1} ; $[\text{VOC}]_i$ 为某个组分 i 在大气中的体积分数, $\times 10^{-9}$; K_i^{OH} 为组分 i 与·OH 自由基的反应速率, 单位为 $\text{cm}^3 \cdot \text{molecule}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 计算 L^{OH} 时对体积分数进行单位换算, 本文中不同 VOCs 组分的 K^{OH} 数据来自文献 [11]。

1.3.2 臭氧生成潜势

考虑到·OH 自由基消耗速率法所忽略的机理活性差异, 研究者在此基础上提出了增量反应活性 (IR) 用来表征单位质量浓度的 VOCs 改变引起的臭氧生成或损耗的变化。臭氧生成潜势表征 VOCs 组分在最佳反应条件下对 O_3 生成的最大贡献, 其计算公式如下:

$$\text{OFP}_i = [\text{VOC}]_i \times \text{MIR}_i \quad (2)$$

式中, OFP_i 为 VOCs 组分 i 的臭氧生成潜势, $\times 10^{-9}$; MIR_i 是 VOCs 中组分 i 的最大增量反应活性, 单位为 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 以 O_3/VOCs 计, 本文中不同 VOCs 组分的 MIR 数据均来自文献 [12]。

1.3.3 二次有机气溶胶(SOA)生成潜势

本研究基于 Grosjean 烟雾箱实验, 采用气溶胶生成系数法 (FAC) 估算大气中 VOCs 的二次气溶胶生成潜势, 其计算公式如下:

$$\text{SOA}_i = [\text{VOC}]_i / (1 - F_{\text{VOC}ri}) \times \text{FAC}_i \quad (3)$$

式中, SOA_i 是 VOC 组分 i 的二次气溶胶生成潜势, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; $F_{\text{VOC}ri}$ 是假定原始排放的 VOCs 反应体积分数; FAC_i 是二次气溶胶生成系数, %。计算时将组分的体积分数换算成质量浓度计算, 公式中用到的 $F_{\text{VOC}ri}$ 和 FAC_i 由烟雾箱实验获得 [13]。

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 大气 VOCs 的污染特征

观测期间安庆市城区环境空气中 VOCs 的日均体积分数是 22.53×10^{-9} , 变化范围为 18.56×10^{-9} — 25.05×10^{-9} 。其中, 烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃的日均体积分数分别为 11.81×10^{-9} 、 4.69×10^{-9} 、 3.81×10^{-9} 和 2.23×10^{-9} 。烷烃占 VOCs 的比例最大, 为 52.40%, 其次是烯烃、炔烃和芳香烃, 分别占 20.81%、16.90% 和 9.89%。

本研究共监测了 57 种 VOCs 组分, 包括 29 种烷烃, 17 种芳香烃, 10 种烯烃, 1 种炔烃。如表 1 所示, 体积分数最高的 10 种物质分别为: 乙炔 (16.92%)、正丁烷 (12.32%)、丙烯 (11.17%)、异戊烷 (10.80%)、乙烷 (8.29%)、异丁烷 (7.68%)、乙烯 (6.16%)、甲苯 (4.60%)、丙烷 (3.09%)、苯 (2.75%), 累计占 VOCs 的 83.78%。由此可见, C_2 — C_5 的低碳烷烃、乙炔、乙烯、丙烯、甲苯和苯是安庆市城区环境空气中 VOCs 的主要组分。

如图 1 所示, 选取采样时间在 4—5 月份的国内其他城市安庆市 VOCs 体积分数对比分析, 发现安庆市城区 VOCs 体积分数远低于长沙 [14] 和连云港 [15], 略低于郑州 [9], 略高过长三角城市南京 [7]、泰州 [16] 和上海 [17]。

表 1 安庆市大气中 VOCs 占比前十的物质浓度水平

Table 1 concentration level of VOCs in the atmosphere of Anqing City

VOCs组分 VOCs component	检出限($\times 10^{-9}$) Detection limit	最大值($\times 10^{-9}$) Maximum value	最小值($\times 10^{-9}$) Minimum value	平均值($\times 10^{-9}$) Average value	标准偏差 Standard deviation	体积分数占比/%Percentage of volume fraction
乙炔	0.01	4.37	3.26	3.81	0.38	16.92
正丁烷	0.06	3.19	2.31	2.78	0.29	12.32
丙烯	0.01	3.62	1.89	2.52	0.53	11.17
异戊烷	0.1	3.44	1.26	2.43	0.90	10.80
乙烷	0.02	2.24	1.35	1.87	0.33	8.29
异丁烷	0.09	2.02	1.37	1.73	0.20	7.68
乙烯	0.02	1.76	1.13	1.39	0.27	6.16
甲苯	0.02	1.12	0.89	1.04	0.10	4.60
丙烷	0.01	0.88	0.54	0.70	0.14	3.09
苯	0.02	0.67	0.56	0.62	0.04	2.75

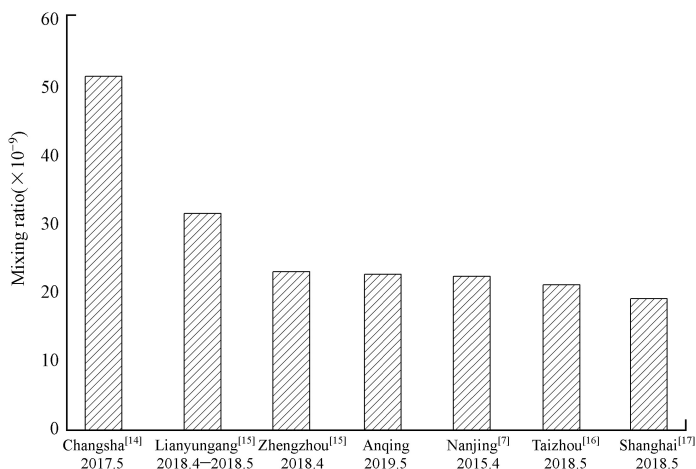


图 1 不同地区 VOCs 浓度对比

Fig.1 VOCs concentration comparison in different regions

2.2 特征比值分析

由于不同排放源具有特定的 VOCs 物种,因此可以利用特定的 VOCs 物种比值来初步判断 VOCs 的来源,通常采用甲苯/苯(T/B)来评价机动车尾气对环境大气的影响程度^[18].通常认为,T/B<2.0 表明苯系物排放受机动车尾气影响显著^[19],T/B>2 表明苯系物排放受溶剂挥发等其他 VOCs 排放源影响较大^[20].安庆市城区大气 VOCs 采样期间,T/B 比值范围为 1.56—1.78,平均值为 1.67,表明安庆市城区大气 VOCs 符合机动车尾气为主要贡献源的特征.

乙炔化学性质较活泼,在大气光化学反应中不断消耗减少,而乙烷的化学性质较稳定,因此常用乙烷与乙炔的浓度比即乙烷/乙炔(E/E)来表征大气气团的光化学年龄.研究显示,机动车原始排放的污染气团中 E/E 比为 0.47 ± 0.26 ^[21].安庆市城区大气 VOCs 采样期间 E/E 的比值范围为 0.41—0.53,平均值为 0.49,与机动车原始排放值基本一致,说明观测站点区域大气老化程度较轻,受本地污染排放影响较大.

2.3 VOCs 关键活性组分

安庆市城区大气 VOCs 组分的 L^{OH} 和 OFP 贡献如表 2 所示.由于 VOCs 组分繁多,化学结构迥异,反应活性不一,导致了烷烃、烯烃、芳香烃和乙炔对大气 VOCs 的 L^{OH} 和 OFP 贡献不一致.由表 2 可见,含量占比 20.74% 的烯烃,其中 L^{OH} 和 OFP 贡献最高,依次为 67.08% 和 69.80%;含量水平最高的烷

烃(52.43%), 其对 L^{OH} 和 OFP 贡献仅为 22.03% 和 15.89%。综上所述, 烯烃类物质对安庆市城区环境空气中臭氧污染影响较大, 控制烯烃类物质的排放, 对改善安庆市臭氧污染尤为重要。

表 2 安庆市城区大气 VOCs 中各类别的体积分数及其对 L^{OH} 和 OFP 贡献比

Table 2 volume fraction of components in air VOCs in Anqing city and their contribution ratio to L^{OH} and OFP

VOCs类别 VOCs category	体积分数占比/% Percentage of volume fraction	L^{OH} 占比/% L^{OH} ratio	OFP占比/% OFP ratio
烷烃	52.43	22.03	15.89
烯烃	20.74	67.08	69.80
芳香烃	9.92	8.73	9.16
炔烃	16.92	2.16	5.14

单个 VOCs 组分对 L^{OH} 和 OFP 贡献排序如图 2 所示, L^{OH} 贡献占比前 10 的组分分别是丙烯、正丁烯、乙烯、异戊烷、反式-2-丁烯、正丁烷、异丁烷、苯、乙炔和反式-2-戊烯, OFP 贡献占比前十的组分分别是丙烯、乙烯、正丁烯、乙炔、正丁烷、苯、异戊烷、异丁烷、反式-2-丁烯和间/对二甲苯。综上所述, 安庆市城区环境空气 VOCs 的关键活性组分为 C2—C4 低碳烯烃、异戊烷、正丁烷、异丁烷、苯和乙炔。

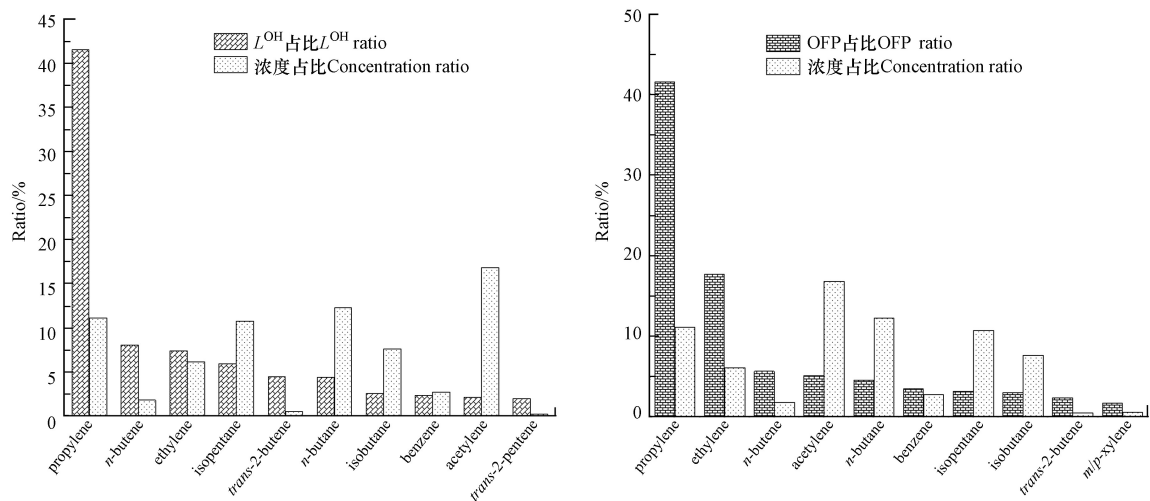


图 2 安庆市城区 VOCs 组分对 L^{OH} 和 OFP 贡献前 10 种物质

Fig.2 The top 10 substances of VOCs species to L^{OH} and OFP in Anqing City

2.4 二次有机气溶胶的生成潜势

VOCs 是 SOA 重要的前体物之一, VOCs 在大气中经氧化生成的挥发性较低的产物通过各种物理化学过程转化为 SOA^[22]。本研究通过计算不同 VOCs 组分对 SOA 的生成潜势, 评估不同种类 VOCs 对 SOA 生成的贡献。在测定的 VOCs 组分中有 26 种对 SOA 具有生成潜势, 包括 11 种烷烃类, 15 种芳香烃类, 还有 1 种烯烃即异戊二烯。

如表 3 所示, 观测期间, SOA 的生成量为 $0.53 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 芳香烃对 SOA 的贡献率最大, 高达 94.09%, 烷烃类和烯烃类对 SOA 的贡献率分别是 5.05%、0.86%。在 26 种 SOA 前体物中贡献率较大的前 10 种 VOCs 组分包括 9 种芳香烃, 1 种烷烃, 分别是甲苯、苯、间/对二甲苯、乙苯、邻二甲苯、对二乙基苯、间乙基甲苯、1,2,4-三甲基苯、癸烷和 1,3,5-三甲基苯, 其贡献率依次分别是 49.30%、9.05%、7.99%、7.78%、5.69%、2.68%、2.50%、1.92%、1.88% 和 1.77%, 共占 SOA 生成潜势的 92.47%。

表 3 观测期间 VOCs 各组分的浓度水平及 SOA 生成潜势

Table 3 concentration level of VOCs components and SOA generation potential during observation

VOCs类别 VOCs category	VOCs组分 VOCs component	平均值($\times 10^{-9}$) Average value	FAC/ %	F_{VOC_i} / %	SOA($\times 10^{-2}$)/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	贡献率/% Contribution rate
烷烃	非SOA前体物	—	—	—	—	—
	甲基环戊烷	0.05	0.17	10	0.04	0.07
	环己烷	0.04	0.17	14	0.03	0.06
	甲基环己烷	0.04	2.7	20	0.53	1.00
	正庚烷	0.03	0.06	14	0.01	0.02
	2-甲基庚烷	0.04	0.5	10	0.12	0.22
	3-甲基庚烷	0.01	0.5	10	0.04	0.07
	正辛烷	0.02	0.06	17	0.01	0.01
	正壬烷	0.01	1.5	20	0.14	0.26
	正癸烷	0.06	2	22	1	1.88
	正十一烷	0.01	2.5	25	0.33	0.63
	正十二烷	0.01	3.00	0.26	0.44	0.83
	小计	0.33	—	—	2.68	5.05
	芳香烃	非SOA前体物	—	—	—	—
苯		0.62	2.00	0.1	4.80	9.05
甲苯		1.04	5.40	0.12	26.18	49.30
乙苯		0.14	5.40	0.15	4.13	7.78
间/对二甲苯		0.13	4.70	0.34	4.24	7.99
邻二甲苯		0.09	5.00	0.26	3.02	5.69
间乙基甲苯		0.03	6.30	0.31	1.33	2.50
1,2,4,-三甲基苯		0.04	2.00	0.58	1.02	1.92
1,3,5,-三甲基苯		0.02	2.90	0.74	0.94	1.77
1,2,3,-三甲基苯		0.02	3.60	0.51	0.73	1.38
对乙基甲苯		0.02	2.50	0.21	0.34	0.64
邻乙基甲苯		0.02	5.60	0.23	0.67	1.26
正丙苯		0.02	1.60	0.12	0.17	0.31
异丙苯		0.01	4.00	0.13	0.35	0.66
间二乙基苯		0.01	6.30	0.47	0.61	1.15
对二乙基苯		0.02	6.30	0.47	1.42	2.68
小计		2.21	—	—	49.96	94.09
烯烃	非SOA前体物	—	—	—	—	—
	异戊二烯	0.08	2.00	0	0.46	0.86
	小计	0.08	—	—	0.46	0.86
合计	2.61	—	—	53.10	100.00	

3 结论(Conclusion)

(1) 安庆市城区环境空气中总 VOCs 的日均体积分数是 22.53×10^{-9} , 变化范围为 18.56×10^{-9} — 25.05×10^{-9} . 烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃占比分别为 52.40%、20.81%、16.90% 和 9.89%. C_2 — C_5 的烷烃、乙烯、丙烯、甲苯和苯是安庆市环境空气中 VOCs 的主要组分.

(2) 采样期间甲苯与苯的浓度比 T/B 比值范围为 1.56—1.78, 均值为 1.67, 小于 2, 表明安庆市城区

大气 VOCs 符合机动车尾气为主要贡献源的特征。采样期间乙烷/乙炔(E/E)的比值范围为 0.41—0.53, 均值为 0.49, 与机动车原始排放值基本一致, 说明观测站点区域大气老化程度较轻, 受本地污染排放影响较大。

(3) 烯烃类物质对安庆市区环境空气中臭氧影响最大, 含量占比 20.81% 的烯烃, 其 L^{OH} 和 OFP 贡献最高, 依次分别为 67.08% 和 69.80%。综合比较各组分对 L^{OH} 和 OFP 的贡献占比, 安庆市城区环境空气中 VOCs 的关键活性组分为 C2—C4 低碳烯烃、异戊烷、正丁烷、异丁烷、苯和乙炔。

(4) 使用 FAC 法估算 SOA 的生成潜势, 结果显示, 观测期间 SOA 总生成潜势为 $0.53 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中芳香烃对 SOA 的贡献率高达 94.09%, 烷烃类和烯烃类对 SOA 的贡献率分别是 5.05%、0.86%。甲苯、苯、间/对二甲苯和乙苯为贡献较大的组分。

参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 2018年中国生态环境状况公报[R]. 2019.
Ministry of Ecological Environment of the People's Republic of China. Bulletin of China's ecological environment in 2018[R]. 2019(in Chinese).
- [2] WANG T, XUE L, BRIMBLECOMB P, et al. Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 575: 1582-1596.
- [3] MATUS K, NAM K, SELIN N E, et al. Health damages from air pollution in China [J]. *Global Environmental Change*, 2012, 22(1): 66.
- [4] 张利慧, 毋振海, 李斌, 等. 北京市城区春季大气挥发性有机物污染特征 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(3): 526-535.
ZHANG L H, WU Z H, LI B, et al. Pollution characterizations of atmospheric volatile organic compounds in spring of Beijing urban area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(3): 526-535(in Chinese).
- [5] 吕子峰, 郝吉明, 段青春, 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.
LV Z F, HAO J M, DUAN Q C, et al. Estimate of the formation potential of secondary organic aerosol in Beijing summer time [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(4): 969-975(in Chinese).
- [6] 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.
WANG Q, CHEN C H, WANG H L, et al. Forming potential of secondary organic aerosols and sources apportionment of VOCs in autumn of Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(2): 424-433(in Chinese).
- [7] 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.
YANG X X, TANG L L, HU B X, et al. Sources apportionment of volatile organic compounds VOCs in summertime Nanjing and their potential contribution to secondary organic aerosols(SOA) [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(10): 2896-2902(in Chinese).
- [8] 卢学强, 韩萌, 冉靓, 等. 天津中心城区夏季非甲烷有机化合物组成特征及其臭氧产生潜力分析 [J]. *环境科学学报*, 2011, 31(2): 373-380.
LU X Q, HAN M, RAN J, et al. Characteristics of nonmethane organic compounds and their ozone formation potentials in downtown Tianjin in summer [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(2): 373-380(in Chinese).
- [9] 张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 等. 郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析 [J]. *环境科学*, 2019, 40(10): 4372-4381.
ZHANG Y X, YIN S S, YUAN M H, et al. Characteristics and source apportionment of ambient VOCs in spring in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4372-4381(in Chinese).
- [10] 王磊. 合肥市环境空气中痕量挥发性有机物的污染特征研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2015.
WANG L. Study on pollution characteristics of trace volatile organic compounds in ambient air of Hefei[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2015(in Chinese).
- [11] ATKINSON R, AREY J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds [J]. *Chemical Reviews*, 2003, 103(12): 4605-4638.
- [12] CARTER W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. *Air & Waste: Journal of the Air & Waste Management Association*, 1996, 44(7): 881-899.
- [13] GROSJEAN, DANIEL. In situ organic aerosol formation during a smog episode: Estimated production and chemical functionality [J]. *Atmospheric Environment*, 1992, 26(6): 953-963.
- [14] 黄海梅, 戴春皓, 王章玮, 等. 长沙市大气挥发性有机物的组成与来源 [J]. *环境化学*, 2019, 38(3): 539-547.
HUANG H M, DAI C H, WANG Z W, et al. Composition and source apportionment of ambient volatile organic compounds in Changsha, China [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(3): 539-547(in Chinese).
- [15] 王伶俐, 李海燕, 陈程, 等. 长三角北部沿海城市2018年大气 VOCs 分布特征 [J]. *环境科学学报*, 2020, 40(4): 1385-1400.

- WANG L R, LI H Y, CHEN C, et al. Distributions of VOCs in a coastal city in the Northern Yangtze River Delta during 2018 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(4): 1385-1400(in Chinese).
- [16] 杨文武. 泰州市环境空气中挥发性有机物分布特征 [J]. *环境监测管理与技术*, 2020, 32(3): 68-71.
YANG W W. Distribution characteristics of volatile organic compounds in the ambient air of Taizhou [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2020, 32(3): 68-71(in Chinese).
- [17] 王倩. 2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源 [J]. *环境科学*, 2020, 41(6): 2555-2564.
WANG Q. Chemical characteristics and source of volatile organic compounds in Shanghai during ozone pollution and particle pollution episode in May, 2019 [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(6): 2555-2564(in Chinese).
- [18] CHAN C Y, CHAN L Y, WANG X M, et al. Volatile organic compounds in roadside microenvironments of metropolitan Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(12): 2039-2047.
- [19] BARLETTA B, MEINARDI S, ROWLAND F S, et al. Volatile organic compounds in 43 Chinese cities [J]. *Atmospheric Environment*. 2005, 39(32): 5979-5990.
- [20] HO K F, LEE S C, GUO H, et al. Seasonal and diurnal variations of volatile organic compounds (VOCs) in the atmosphere of Hong Kong [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 322(1-3): 155-166.
- [21] DUFFY B L, NELSON P F. Non-methane exhaust composition in the Sydney Harbour Tunnel: A focus on benzene and 1, 3-butadiene [J]. *Atmospheric Environment*. 1996, 30(15): 2759-2768.
- [22] 杨燕萍, 王莉娜, 杨丽丽, 等. 兰州工业区夏季挥发性有机物污染特征研究 [J]. *环境与发展*, 2020, 32(4): 163-165.
YANG Y P, WANG L N, YANG L L, et al. Summer pollution characteristics of volatile organic compounds in Lanzhou industrial area [J]. *Environment and Development*, 2020, 32(4): 163-165(in Chinese).