

西安南郊地区冬季 VOCs 反应活性及健康风险评价

祝颖^{1,2}, 宋珊珊^{1,2}, 刘焕武³, 陈一龙^{1,2}, 刘诗云⁴, 李业鑫⁵

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 西安市环境监测站, 陕西 西安 710019; 4. 北京中科三清环境技术有限公司, 北京 101500; 5. 安康市环境工程设计有限公司, 陕西 安康 725000)

摘要:于2020年12月—2021年2月监测西安市南郊地区55种VOCs组分,采用最大增量反应活性系数法和气溶胶生成系数法分别计算VOCs中的O₃及二次有机气溶胶的生成潜势,并做健康风险评价。结果表明,VOCs监测结果为烷烃类>芳香烃类>醛酮类>烯烃类>炔烃类。综合考虑物种反应活性,对/间二甲苯、乙烯和己醛是对O₃生成贡献最大的3种组分,二次有机气溶胶生成潜势贡献率的前三分别为对/间二甲苯、甲苯和乙苯。优先控制芳香烃类、醛酮类和烯烃类化合物的排放是改善西安市冬季O₃污染的关键,苯和乙苯对人体存在可能的致癌风险,未来应加强防控。

关键词: VOCs; O₃生成潜势; 二次有机气溶胶; 健康风险评价; 西安市

中图分类号: X51; X820.4 **文献标志码:** B **文章编号:** 1006-2009(2024)06-0072-05

Reactivity and Health Risk Assessment of VOCs in Winter in Southern Suburbs of Xi'an

ZHU Ying^{1,2}, SONG Shanshan^{1,2}, LIU Huanwu³, CHEN Yilong^{1,2}, LIU Shiyun⁴, LI Yexin⁵

(1. School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 3. Xi'an Environmental Monitoring Station, Xi'an, Shaanxi 710119, China; 4. Beijing Zhongke Sanqing Environmental Technology Co., Ltd., Beijing 101500, China; 5. Ankang Environmental Engineering Design Limited Company, Ankang, Shaanxi 725000, China)

Abstract: From December 2020 to February 2021, 55 kinds of VOCs in the southern suburbs of Xi'an were monitored. The formation potential of O₃ and secondary organic aerosols in VOCs was calculated by maximum incremental reactivity coefficient and aerosol formation coefficient, respectively, and the health risks were evaluated. Results showed that the concentration of VOCs ranked as alkanes>aromatics>aldehydes/ketones>alkenes>alkynes. Considering species reactivity, *p*-/*m*-xylene, ethylene and hexanal were the top three contributors to the formation of O₃, and *p*-xylene, toluene and ethylbenzene were the top three contributors to the formation of secondary organic aerosols. Priority control of aromatic hydrocarbons, aldehydes and ketones, alkenes emission was crucial in reducing O₃ pollution in winter in Xi'an. Benzene and ethylbenzene may be carcinogenic risk to human body, and prevention and control measures should be strengthened in the future.

Key words: VOCs; Ozone formation potential; Secondary organic aerosol; Health risk assessment; Xi'an

近地表VOCs是大气光化学反应产生O₃污染的重要前体物,与环境空气质量、公众健康及气候变化密切相关。目前,我国关于VOCs的研究区域主要集中在京津冀、长三角、珠三角等地区,研究内容主要集中于城市环境空气VOCs时空变化及排放

收稿日期:2023-10-08;修订日期:2024-09-09

基金项目:国家重点研发计划大气专项基金资助项目(2016YFC0207800);陕西省教育厅重点科学研究计划基金资助项目(21JY025,20JY042)

作者简介:祝颖(1984—),女,内蒙古赤峰人,副教授,博士,主要研究方向为大气污染控制。

源特征、化学反应活性和健康风险评价等方面^[1-3], 其中化学反应活性包括 O₃ 生成潜势 (OFP)、二次有机气溶胶生成潜势 (SOA_{FP})。VOCs 种类繁多, 分为烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、卤代烃、醛酮化合物等^[4]。由于检测仪器的差别, 大多学者只分析了烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃化合物对大气反应活性的作用^[5-6], 醛酮化合物属于含氧挥发性有机物, 其氧化及直接的光解亦可对自由基和大气中二次污染物的形成产生重要影响^[7]。

近年来, 我国关中地区 VOCs 浓度持续升高, 形成二次有机气溶胶 (SOA), 已成为冬季影响空气质量的重要因素。为分析西安市南郊地区大气 VOCs 变化特征及其化学反应活性, 今基于 2020 年 12 月 1 日—2021 年 2 月 28 日西安南郊地区 VOCs 的小时观测数据, 对 VOCs 浓度水平和组成特征进行分析, 通过最大增量反应活性系数法和气溶胶生成系数法分别计算 VOCs 的 OFP 及 SOA_{FP}, 并用美国环境保护署 (USEPA) 的健康风险评价方法对重点污染物进行非致癌和致癌风险分析, 以期为该区域 VOCs 的防控提供支撑。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 样品采集及数据来源

采样地点位于陕西省西安市高新区新纪元公园内 (E108.89°, N34.22°), 海拔 412 m。采样点附近 500 m 内包含两家餐饮店, 西侧及东北部 2 km 内存在制药企业和机械制造企业, 东部有热源厂。采样时间为 2020 年 12 月 1 日 0 时—2021 年 2 月 28 日 23 时, 共计采样 90 d, 2 160 个小时采样单元。局部气象数据由 WAX100-05 型集成式气象参数观测设备测得; 环境空气数据由 LFAA-2012 型在线空气质量观测仪测得; VOCs 组分由 LFGGC-2013 型检测仪连续监测; 太阳辐射 (DSWF) 和行星边界层高度 (PBLH) 等气象数据来自气象网站 (<http://rp5.ru>) 及美国国家海洋大气管理局 (NOAA) 的全球资料同化系统 (GDAS), 时间分辨率为 3 h。

1.2 样品分析方法

采用 LFGGC 系列检测仪对西安市高新西区环境空气中的 VOCs 进行连续采集分析, 用气相色谱—氢火焰离子化检测器 (GC-FID) 测定; NO_x 采用在线化学发光法分析; SO₂ 采用在线紫外荧光法分析; O₃ 采用在线紫外吸收光度法分析; CO 采用在

线气体滤光相关红外吸收法分析; PM₁₀、PM_{2.5} 采用在线 β 射线法分析。

1.3 OFP

OFP 根据环境 VOCs 浓度和相应的 MIR 因子计算得到, 可用来评估 VOCs 排放在大气中参与反应生成 O₃ 的潜力。采用 Carter^[8] 提出的 MIR 系数法分析西安市南郊 VOCs 的 OFP, 得出各 VOCs 在最佳反应条件下对 O₃ 生成的最大贡献, 见式 (1)。

$$\text{OFP}_i = \text{VOC}_i \times \text{MIR}_i \quad (1)$$

式中: OFP_i 为第 *i* 种 VOCs 组分的 O₃ 生成潜势, μg/m³; VOC_i 为第 *i* 种 VOCs 组分质量浓度, 由相关仪器采样测定, μg/m³; MIR_i 为第 *i* 种 VOCs 组分的相关最大增量反应活性系数, 具体数值取自 Carter^[8] 的研究。

1.4 SOA_{FP}

采用 FAC 系数法对 SOA_{FP} 进行估算, 能够通过环境浓度直接计算出 SOA_{FP} 值。Grosjean 等^[9-10] 假设 VOCs 生成 SOA_{FP} 是固定不变的, 并根据烟雾箱实验的结果提出了气溶胶生成系数的概念, 用 SOA_{FP} 反映 SOA 生成与 VOCs 初始浓度之间的关系, 并对多种 VOCs 的气溶胶生成系数进行测定, 通过计算可以得出 VOCs 对生成 SOA 的贡献程度, 见式 (2)。由于测得的 VOCs 值与实际值有差异, 受体点测定值是经过大气氧化后的数据, 故须根据式 (3) 计算 VOCs 物种初始质量浓度。

$$\text{SOA}_{\text{FP}} = \text{VOC}_{i0} \times \text{FAC}_i \quad (2)$$

$$\text{VOC}_{i0} = \frac{\text{VOC}_i}{1 - F_{\text{VOC}_i}} \quad (3)$$

式中: SOA_{FP} 为 VOCs 对 SOA 的生成潜势, μg/m³; VOC_{i0} 为排放源排出的 VOC 物种初始质量浓度, μg/m³; VOC_i 为环境中 VOCs 物种的实测质量浓度, μg/m³; F_{VOC_i} 为该物种参与反应的质量分数, %; FAC_i 为物种 *i* 的 SOA 生成系数, %。FAC 和 F_{VOC} 的值由 Grosjean 等^[9-10] 的烟雾箱实验获得。

1.5 健康风险评价

1983 年 USEPA 提出健康风险评价四阶段法, 包括危害鉴定、剂量-反应关系评价、暴露评价和风险特征分析 4 步, 是目前世界范围内通用的健康风险评价方法^[11]。由于相关准则的使用较为久远, 风险评价的方法较为普遍且成熟, 相关健康风险评价参数信息也较为广泛和全面, 故近年来学者多采

用该方法对相关 VOCs 的风险进行评价。由此估算危害指数 (HI) 和终生致癌风险 (LCR), 以评估吸入 VOCs 对人群的非致癌和致癌风险, 计算公式见式 (4) — (5)。

$$HI = \frac{CA \times ET \times EF \times ED}{365 \times AT_{nca} \times 24} \times \frac{1}{RfC} \quad (4)$$

$$LCR = \frac{CA \times ET \times EF \times ED}{365 \times AT_{ca} \times 24} \times IUR \quad (5)$$

式中: HI 为呼吸暴露途径的长期摄入量与参考剂量的比值, 当 $HI \geq 1$ 时, 暴露人群在此环境条件下可能表现出不良反应; RfC 为各化合物的参考浓度; LCR 为暴露人群癌症发生的概率, 通常以单位数量人口出现癌症患者的比例表示, 若 LCR 为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ (即每 1 万人 ~ 100 万人增加 1 个癌症患者), 则认为该物质具有致癌风险; IUR 为单位吸入风险值, $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$, 表示人体通过呼吸途径暴露于一定剂量的某种污染物下产生致癌效应的最大概率; CA 为大气中污染物质量浓度, mg/m^3 ; ET 为暴露时间, 8 h; EF 为暴露频率, 250 d/a; ED 为持续暴露时间, 30 a; AT_{nca} 为非致癌平均时间, 30 a; AT_{ca} 为致癌平均时间, 70 a。

2 结果与讨论

2.1 VOCs 污染特征

2020 年 12 月—2021 年 2 月, 12 月、1 月、2 月风速均值分别为 $(0.59 \pm 0.27) \text{ m/s}$ 、 $(0.58 \pm 0.27) \text{ m/s}$ 、 $(0.57 \pm 0.26) \text{ m/s}$, 风向多为东北方向和南方向, 风速较小, 利于监测 VOCs 各项污染物指标。气象参数、 O_3 及其前体物日变化序列监测结果见图 1(a)(b)(c)(d)。监测期间西安市温度均值为 $(6.15 \pm 4.97) ^\circ\text{C}$, 相对湿度均值为 $(49.71 \pm 18.90) \%$, 气压均值为 $(976.50 \pm 7.03) \text{ hPa}$ 。为评估西安南郊地区大气 VOCs 的污染特征及影响因素, 本次研究测得 55 种 VOCs 成分, 其中烷烃类有 27 种, 烯烃类有 9 种, 炔烃类有 1 种, 芳香烃类有 13 种, 醛酮类有 5 种。监测期间 VOCs 均值为 $(56.62 \pm 19.96) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 其中烷烃类 $(29.12 \pm 10.24) \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 芳香烃类 $(9.86 \pm 5.75) \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 醛酮类 $(8.28 \pm 6.38) \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 烯烃类 $(7.31 \pm 2.73) \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 炔烃类 $(2.07 \pm 1.68) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。NO 均值为 $(33.05 \pm 29.03) \mu\text{g}/\text{m}^3$, NO_2 均值为 $(57.35 \pm 19.36) \mu\text{g}/\text{m}^3$, O_3 均值为 $(24.24 \pm 12.62) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

监测期间, 西安市太阳辐射逐渐增强, 大气压

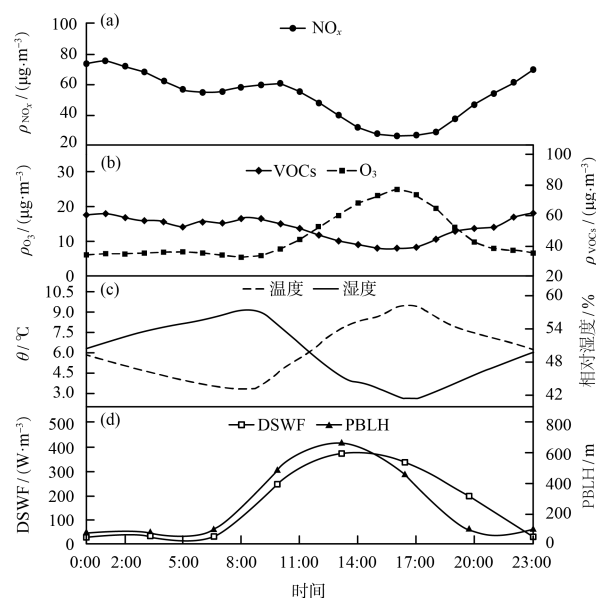


图 1 气象参数、 O_3 及其前体物日变化序列

Fig. 1 Daily variation sequence of meteorological parameters, O_3 and its precursors

逐渐降低, 日照时长增加约 1 h, 2 月平均温度比 12 月平均温度高 $6.58 ^\circ\text{C}$, 更高的温度有利于光化学反应的发生。作为生成 O_3 的重要前体物, VOCs 与 O_3 的体积分数变化密切相关, 且 VOC 低值与 O_3 高值相对应, 呈负相关。气象变化对 VOCs、 NO_x 和 O_3 的影响可以在日变化时间轴上厘清相互关系。VOCs 和 NO_x 的变化规律基本一致, 在 PBLH 和 DSWF 升高的同时, 温度升高, 湿度降低, O_3 体积分数逐时升高, 而前体物 VOCs 和 NO_x 则整体呈现降低趋势。这是由于当大气中 VOCs 参与反应后, 整个循环过程变得更加复杂, $\cdot\text{OH}$ 或 $\text{NO}_3 \cdot$ 使 VOCs 发生氧化反应进而生成烷基自由基 ($\text{R} \cdot$)、过氧烷基自由基 ($\text{RO}_2 \cdot$) 和 $\text{HO}_2 \cdot$, NO 向 NO_2 转变, NO_2 发生光解, 形成 O_3 [12-13]。对流层 O_3 光化学净生成和净损耗依赖于 NO 和 VOCs 浓度, 并受到 $\text{HO}_2 \cdot$ 和 $\text{RO}_2 \cdot$ 的反应速率常数的影响, VOCs、 NO_x 和 O_3 之间的反应始终处于动态平衡, 不会造成 O_3 的净增加或损失 [12]。

2.2 OFP 分析

大气中 VOCs 是形成 O_3 进而引发光化学污染的重要来源。为评估不同 VOCs 组分对于西安南郊地区 O_3 的贡献情况, 本次研究计算了所测得的 55 种 VOCs 成分的 OFP。对 OFP 贡献最多的组分为芳香烃 (51.16%), 其次为烯烃 (19.57%)、醛酮

类(14.72%)、烷烃(14.11%)、贡献最少的为炔烃(0.44%)。

冬季监测时段内 OFP 均值为 $(262.34 \pm 123.76) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 对/间二甲苯、乙烯和己醛是对 OFP 贡献最大的 3 种组分, 贡献率分别为 20.17%、10.60% 和 7.18%。虽然乙烯的测定值最高 $(5.45 \mu\text{g}/\text{m}^3)$, 但其最大增量反应活性系数较小, 故对 OFP 的贡献低于对/间二甲苯。冬季 OFP 最大的 10 种组分中有 2 种烯烃、5 种芳香烃和 3 种醛酮类, 虽然冬季烷烃的测定值较高, 但对于总 OFP 的贡献较小, 而芳香烃的浓度虽然远低于烷烃, 却对总 OFP 的贡献最大。这与芳香烃的化学性质有关, 芳香烃属于不饱和烃, 化学性质较活泼, 生成 O_3 的活性强^[14]。因此, 减少芳香烃类的排放是本地区控制 O_3 前体物的重要途径。

2.3 SOA_{FP} 分析

在大气光化学反应过程中, SOA 作为大气光化学反应的产物, 同时也是城市和郊区大气中细粒子的主要成分。VOCs 经过大气化学反应之后被转化为不挥发或半挥发的有机物, 成为 SOA。PM_{2.5} 中 20% ~ 90% 为有机气溶胶, 其中 SOA 的贡献率可达 20% ~ 80%^[15]。为评估不同 VOCs 组分对于西安南郊地区 SOA 的贡献情况, 本次研究计算了所测得的 25 种 VOCs 成分的 SOA_{FP}, 对 SOA_{FP} 贡献最多的组分为芳香烃(82.18%), 其次为烷烃(13.01%)、烯烃(4.81%), 而炔烃和醛酮类则对 SOA_{FP} 没有贡献。其中, 对/间二甲苯(24.97%)和甲苯(17.53%)是 SOA 形成的重要贡献者。

监测到的 SOA_{FP} 前 10 种成分中共有 1 种烷烃、1 种烯烃, 其余均为芳香烃。高新西区的 SOA_{FP} 中排名前三的有机物均为芳香烃, 分别为对/间二甲苯、甲苯和乙苯, 对应的贡献率分别为 24.97%、17.53% 和 8.87%。芳香烃的来源广泛, 主要存在于汽车尾气及有机溶剂中。由于多数芳香烃具有较强的挥发性, 在常温条件下, 芳香烃的生产、储运和使用过程中均会因挥发而造成大气污染。本地区的芳香烃是导致 SOA 生成的重要原因^[14]。

2.4 VOCs 健康风险分析

健康风险评价主要是利用污染物对人体发生负面反应几率的计算, 来评估人体发生某种病变甚至死亡的可能性。USEPA 提出的健康风险评价四

阶段法认为 VOCs 对于健康的潜在危害分为 4 种: ①物理性危害, 皮肤黏膜损伤, 损害表皮层或者损害牙齿; ②化学性危害, 影响气体交换过程, 影响呼吸及神经系统; ③生物性危害, 造成机体病变或癌变; ④生理及心理性危害, 异于平常的环境污染造成的感官感受异常或心理异常。

国际癌症研究所将已进行致癌研究的化学物质分为 4 类。1 类: 对人体致癌性证据充分; 2 类: A 组虽然对人体致癌性证据有限, 但对动物致癌性证据充分, B 组人体致癌性证据有限, 对动物致癌性证据也不充分; 3 类: 现有证据未能对人类致癌性进行分级评价; 4 类: 对人体可能是非致癌物。根据 USEPA^[11] 公布的 187 种大气优先控制污染物筛选出 8 种具体物质作为此次健康风险评价的目标物质, 即苯、甲苯、乙苯、邻二甲苯、对/间二甲苯、苯乙烯、异丙苯和乙醛, 致癌等级分别为 1 类、3 类、2B 类、3 类、2B 类、3 类和 2 类。

对于有阈值的有毒有害化学物质, 通过人体有阈值化学物质的慢性日均摄入量与参考浓度之间的关系来进行有毒有害物质呼吸暴露途径的非致癌风险评估。根据 USEPA 提供的各化合物的 IUR 和 RfC 等参数, 计算得到致癌和非致癌风险值。为了更加准确地评估研究所在地所面临的潜在健康风险, 参考文献[16], 将部分暴露参数进行了调整。按公式(4)~(5)计算, 结果见表 1。由表 1 可知, 在检测出的 VOCs 中有 8 种化合物包含在 USEPA 公布的有毒有害空气污染物名单中。其中, 苯被国际癌症研究机构认定为 1 类致癌物质。根据 USEPA 标准, 当化合物非致癌风险危害阈值(HQ) < 1 时, 不会对人体有明显伤害。西安市南郊地区监测点周围空气中的 VOCs 各组分当中, 各项典型污染物的 HQ 值均 < 1, HQ 值较高的 5 种化合物分别是对/间二甲苯、正壬烷、苯、邻二甲苯、1,2,3-三甲苯, 其中 HQ 值最高的对/间二甲苯值为 2.71×10^{-2} , 典型污染物的 HI 为 8.35×10^{-2} , 大气中 VOCs 非致癌风险危害阈值均在 USEPA 认定的安全值范围内。就致癌风险而言, HQ > 10^{-4} 的化合物被认为是“确定的风险”, 在 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 之间的化合物被认为是“较大可能的风险”, 在 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 之间的为“可能的风险”, < 10^{-6} 的被看作可忽略的风险。本研究仅针对有单位风险值的苯和乙苯进行 LCR 评估。观测期间苯的 IUR 为 7.80×10^{-6} 、LCR 为 1.22×10^{-6} , 乙苯的 IUR 为 $2.50 \times$

10^{-6} 、LCR 为 1.09×10^{-6} , 均超过了安全阈值 (10^{-6}), 表明苯和乙苯会存在“可能的风险”, 应给予重视。

表1 VOCs 有毒有害健康风险评估值

Table 1 Health risk assessment of toxic and harmful VOCs

化合物	RfC $\rho / (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	HQ
正戊烷	1	7.55×10^{-4}
正己烷	7×10^{-1}	5.46×10^{-4}
环己烷	6	8.10×10^{-5}
正庚烷	4×10^{-1}	1.46×10^{-3}
甲基环己烷	3	1.08×10^{-4}
正壬烷	2×10^{-1}	1.43×10^{-2}
丙烯	3	1.51×10^{-4}
苯	3×10^{-2}	1.21×10^{-2}
甲苯	5	4.09×10^{-4}
乙苯	1×10^{-1}	1.02×10^{-3}
对/间二甲苯	1×10^{-1}	2.71×10^{-2}
苯乙烯	1	6.86×10^{-4}
邻-二甲苯	1×10^{-1}	7.71×10^{-3}
正丙苯	1	3.58×10^{-4}
1,3,5-三甲苯	6×10^{-2}	2.37×10^{-3}
1,2,4-三甲苯	6×10^{-2}	6.68×10^{-3}
1,2,3-三甲苯	6×10^{-2}	7.53×10^{-3}

3 结语

通过监测冬季西安市南郊地区的 VOCs, 分析其化学组分特征及化学反应活性, 发现 VOCs 平均值为 $(56.62 \pm 19.96) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 其中烷烃占比最大达 51.43%, VOCs 变化规律呈现夜间高、白天低的特征。监测期间对 OFP 和 SOA_{FP} 贡献较大的物种及占比分别为对/间二甲苯 (20.17%)、乙烯 (10.60%)、己醛 (7.18%) 和对/间二甲苯 (24.97%)、甲苯 (17.53%)、乙苯 (8.87%)。健康风险分析结果表明, 监测期间虽然苯和乙苯的致癌风险分别为 1.22×10^{-6} 和 1.09×10^{-6} , 均超过了安全阈值 (10^{-6}), 但大气中 VOCs 各组分的 HQ 值均 < 1 , 在 USEPA 认定的安全值范围内。因此, 优先控制芳香烃类、醛酮类和烯烃类化合物的排放是改善西安市冬季 O_3 污染的关键, 苯和乙苯对人体存在可能的致癌风险, 未来应加强防控, 推进涉 VOCs 企业、行业低挥发性原辅材料替代和污染治理设施的升级改造。

[参考文献]

[1] 刘新军, 王淑娟, 刘程, 等. COVID-19 疫情期间雄安新区

VOCs 的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析[J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1268-1276.

- [2] HE X, ZHENG X, YOU Y, et al. Comprehensive chemical characterization of gaseous I/SVOC emissions from heavy-duty diesel vehicles using two-dimensional gas chromatography time-of-flight mass spectrometry [J]. Environmental Pollution, 2022, 305: 119284.
- [3] FU S, GUO M X, LUO J M, et al. Improving VOCs control strategies based on source characteristics and chemical reactivity in a typical coastal city of South China through measurement and emission inventory [J]. Science of the Total Environment, 2020, 744: 140825.
- [4] SEINFELD J H, PANDIS S N. Atmospheric chemistry and physics [M]. 3th ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2016: 175-264.
- [5] ZHAN J L, FENG Z M, LIU P F, et al. Ozone and SOA formation potential based on photochemical loss of VOCs during the Beijing summer [J]. Environmental Pollution, 2021, 285: 117444.
- [6] 朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 等. 大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源 [J]. 环境科学, 2022, 43(8): 3944-3952.
- [7] 武彩虹. 广州城市地区大气挥发性有机物 (VOCs) 反应活性贡献研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2020.
- [8] CARTER W P L. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism [J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(40): 5324-5335.
- [9] GROSJEAN D. In situ organic aerosol formation during a smog episode: Estimated production and chemical functionality [J]. Atmospheric Environment, 1992, 26(6): 953-963.
- [10] GROSJEAN D, SEINFELD J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols [J]. Atmospheric Environment, 1989, 23(8): 1733-1747.
- [11] USEPA. Risk assessment guidance for superfund volume I: Human health evaluation manual (Part F, Supplemental guidance for inhalation risk assessment) [EB/OL]. [2022-11-07]. https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/399222.
- [12] ZHAO Y S, LI Y T, KUMAR A, et al. Separately resolving NO_x and VOC contributions to ozone formation [J]. Atmospheric Environment, 2022, 285: 119224.
- [13] RATHOD A, SAHU S K, SINGH S, et al. Anomalous behaviour of ozone under COVID-19 and explicit diagnosis of O_3 - NO_x -VOCs mechanism [J]. Heliyon, 2021, 7(2): e06142.
- [14] 王鑫. 安徽省大气中挥发性有机物污染特征、来源解析及健康风险评估 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [15] CHUANG M T, CHOU C K, LIN C Y, et al. A numerical study of reducing the concentration of O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ simultaneously in Taiwan [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 318: 115614.
- [16] 段小丽. 中国人群暴露参数手册 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.