

泰州市夏季大气典型 VOCs 污染特征及健康风险评估

苏文鹏^{1,2}, 毛慧¹, 乐小亮¹, 张宗祥¹, 徐亮¹

(1. 江苏省泰州环境监测中心, 江苏 泰州 225300; 2. 江苏省环境保护土壤有机物监测重点实验室, 江苏 泰州 225300)

摘要:于2019年8—9月,采用大气预浓缩-气相色谱质谱联用仪(GC-MS)对泰州市3个监测点位环境空气中57种挥发性有机物(VOCs)进行分析,并开展了VOCs组成特征、臭氧生成潜势(OFP)、VOCs来源及健康风险评估研究。结果表明:3个点位环境空气中 φ (VOCs)范围为 $1.3 \times 10^{-9} \sim 46.9 \times 10^{-9}$,平均值为 8.5×10^{-9} 。烷烃在VOCs中所占比例最大。各点位 φ (VOCs)平均值依次为:工业园区>公园路>天德湖公园。公园路点位VOCs中苯系物受汽车尾气排放影响较大,天德湖公园和工业园区点位除了受汽车尾气排放影响,还受到有机溶剂和涂料的挥发影响,主要受本地污染主导。OFP中贡献最大的物质为乙烯,OFP值为 $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$,其次为烷烃。健康风险评估结果显示,各点位VOCs非致癌类风险均较低,处于安全范围内。各点位夏季环境空气中苯对人体均具有一定致癌风险。

关键词:挥发性有机物;污染特征;臭氧生成潜势;健康风险评估

中图分类号:X511;X820.4

文献标志码:A

文章编号:1674-6732(2022)04-0078-06

Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Summer in Taizhou

SU Wen-peng^{1,2}, MAO Hui¹, YUE Xiao-liang¹, ZHANG Zong-xiang¹, XU Liang¹

(1. Jiangsu Taizhou Environmental Monitoring Center, Taizhou, Jiangsu 225300, China; 2. Jiangsu Province Ecology and Environment Protection Key Laboratory of Soil Organics Monitoring, Taizhou, Jiangsu 225300, China)

Abstract: To explore the characteristics, ozone formation potential (OFP), sources and health risks of volatile organic compounds (VOCs) in summer in Taizhou, 57 kinds of VOCs species at three sites were analyzed by cryogenic trapping-GC/MS from August to September 2019. The results showed that the concentration of VOCs ranged from $1.3 \times 10^{-9} \sim 46.9 \times 10^{-9}$, with an average of 8.5×10^{-9} . The VOCs were mainly composed of alkanes. The average φ (VOCs) arranged in a sequence of industrial zone > gongyuan road > tiandehu park. BTEX in gongyuan road site were greatly influenced by motor vehicles, while except that, the traffic emission and solvent usage were also the main sources of BTEX at the other two sites. The concentrations of VOCs at industrial zone and gongyuan road were mainly affected by local pollution sources. Among OFP substances, ethylene contributed the most with the OFP value $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, followed by alkanes. Health risk assessment showed that the non-carcinogenic risks of VOCs at the three sites were within acceptable limits. Benzene was associated with a certain risk of cancer in summer.

Key words: VOCs; Pollution characteristics; Ozone formation potential; Health risk assessment

“十三五”期间,我国多数地区臭氧(O₃)污染呈现出逐年加重的趋势,2018年,全国337个城市有近30%的城市环境空气中O₃超标,其中长三角和京津冀区域O₃污染情况尤为突出^[1]。挥发性有

机物(VOCs)作为O₃生成的重要前体物,对大气O₃污染、二次气溶胶及灰霾的形成具有重要影响^[2]。VOCs主要包括烷烃类、烯烃类、芳香烃类等化合物^[3],具有较强的化学反应活性,极易造成环境污

收稿日期:2022-01-19;修订日期:2022-02-11

基金项目:江苏省环境保护土壤有机物监测重点实验室科研基金资助项目

作者简介:苏文鹏(1988—),男,工程师,博士,主要从事大气环境监测污染与防治工作。

染。因此,研究分析 VOCs 组成特征及浓度变化对研究 O₃ 污染的形成机理至关重要。

近年来,国内外对 VOCs 的排放浓度、污染特征、来源情况开展了深入研究,李丽娟等^[4]发现朔州地区 VOCs 以烷烃和芳香烃类有机物为主,同时,该地区烯烃、芳香烃类的反应活性明显高于烷烃类。张翼翔等^[5]利用正定矩阵因子分析模型(PMF)进行源解析,认为郑州市环境空气中 VOCs 主要来源于溶剂使用、机动车尾气及工业过程。张敬巧等^[6]通过对 OH 消耗速率(L_{OH})和臭氧生成潜势(OFP)的估算发现醛酮类、芳香烃类和烯烃类是主要的反应活性物质。Li 等^[7]研究发现,北京地区大气 VOCs 中烯烃类和芳香烃类对 OFP 贡献最大。泰州作为长三角地区中心城市之一,O₃ 污染日趋严重,且泰州市分布有大量涂料加工、医药制造、化工生产等 VOCs 排放量较大的企业,辖区内环境空气中 VOCs 污染特征及来源分析迫在眉睫。

现对泰州市 3 个监测点位环境空气中 VOCs 污染特征及其 OFP 开展研究,分析 VOCs 特定组分的相关性,同时利用美国环保局(US EPA)健康风险评估模型对 VOCs 优势组分进行致癌和非致癌风险评估,以期为泰州市大气 O₃ 污染治理提供理论支撑。

1 研究方法

1.1 采样点位

选择能够代表泰州市不同功能区环境空气中 VOCs 的污染特征的区域开展采样工作。采样点位示意图 1。

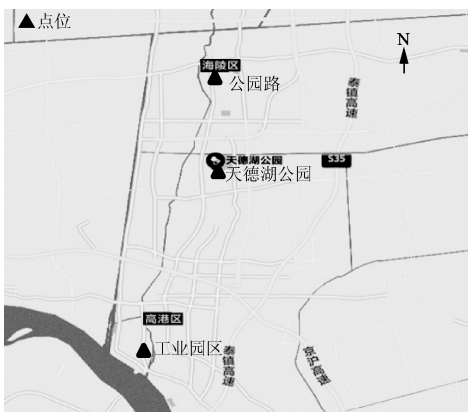


图 1 采样点位示意

公园路点位位于城市中心,周边交通密集,人口众多;天德湖公园点位位于泰州市高港区,毗邻海陵路与鼓楼路两大主干道,属于城市郊区,周边污染源相对较少。工业园区点位位于滨江工业园区,周边分布有大量化工企业。

1.2 采样时间

2019 年 8 月 11 日—9 月 30 日。

1.3 样品采集

每天采集 1 次样品,采样均选取晴好或无雨的天气下进行,共采集有效样品 147 个。主要对 VOCs 中 57 种 O₃ 前体物开展监测。

1.4 监测仪器及指标

VOCs 分析仪器为 Entech 7200 大气预浓缩仪-气相色谱/质谱联用仪(ISQ7000,美国 Thermo 公司)。使用 Linde 公司提供的混合标准气体。实验使用的内标气和 VOCs 标气由 Entech 4700 动态稀释仪(美国 ENTECH 公司)进行稀释。乙烯、乙炔、乙烷、丙烯、丙烷由氢离子火焰检测器(FID,美国 Thermo 公司)分析,其余组分由气相色谱-质谱分析仪(ISQ7000,美国 Thermo 公司)完成。

1.5 监测方法

监测方法参照《环境空气 臭氧前体有机物的测定 罐采样/气相色谱-氢离子火焰检测器/质谱检测器联用法》(DB/T 4434—2021)和《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)。

1.6 质量控制

为保证监测数据的有效性,采样和分析过程中严格执行相关标准规范中规定的质量保证和质量控制措施,苏玛罐在采样前经过 6~8 次清洗,每清洗 10 只苏玛罐应随机抽取 1 只进行空白检验,所有目标化合物应低于方法检出限。每 10 个样品或每批样品应至少分析 1 个平行样,结果相对偏差不超过 20%;同时应分析 1 次单点质控标气,目标化合物浓度偏差应 < 30%。

1.7 OFP 计算方法

环境空气中 VOCs 反应生成 O₃ 的量取决于不同组分被氧化的速率、具体的氧化机理、VOCs 组分在大气中的浓度等因素^[8]。Wu^[9]提出最大增量反应活性(MIR)可以用来衡量 VOCs 不同组分经过反应生成 O₃ 的 OFP,具体计算公式如下:

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

式中:(VOCs)_i——VOCs 中物质 i 的质量浓

度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; MIR_i ——VOCs 中物质 i 的 O_3 最大增量反应中的 O_3 生成系数。

1.8 健康风险评估方法

健康风险评估是定量地描述人体暴露剂量和不良反应之间的方式^[10]。采用 US EPA 健康风险评估模型^[11], 暴露浓度计算公式如下:

$$\text{EC} = (\text{CA} \times \text{ET} \times \text{EF} \times \text{ED}) / \text{AT} \quad (2)$$

式中: EC——污染物的暴露质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; CA——环境空气中 VOCs 组分的质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; ET——暴露时间, 24 h/d; EF——暴露频率, 365 d/a; ED——暴露年限, 79 a; AT——平均暴露时间, $79 \times 365 \times 24$ h。

终生致癌风险(R)计算公式如下:

$$R = \text{EC} \times \text{IUR} \quad (3)$$

式中: R ——终生致癌风险, 无量纲; IUR——单位致癌风险, $\text{m}^3/\mu\text{g}$ 。

非致癌风险危害商(HQ)与多组分危害指数(HI)计算公式如下:

$$\text{HQ} = \text{EC} / (\text{RFC}_i \times 1000) \quad (4)$$

$$\text{HI} = \sum [\text{EC} / (\text{RFC}_i \times 1000)]$$

式中: HQ——人体暴露某污染物的健康风险, 无量纲; RFC_i ——污染物 i 在某种暴露途径下的参考质量浓度, mg/m^3 ; HI——多组分危害指数, 无量纲。

2 结果与讨论

2.1 VOCs 组分分布特征

泰州市夏季环境空气中 VOCs 组成较为复杂, 3 个监测点位 $\varphi(\text{VOCs})$ 变化范围为 $1.3 \times 10^{-9} \sim 46.9 \times 10^{-9}$ 。监测期间泰州市环境空气 VOCs 分布特征见图 2。由图 2 可见, 泰州地区 VOCs 平均值为 8.5×10^{-9} , 工业园区最高为 10.7×10^{-9} , 公园路为 7.7×10^{-9} , 天德湖公园为 7.0×10^{-9} 。监测点位中烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃的分布较为相似, 烷烃占比最高, 其次为烯烃, 芳香烃、炔烃。从监测结果看, 泰州地区夏季 $\varphi(\text{VOCs})$ 低于桂林城区 (21.32×10^{-9}), 也明显低于武汉城区 (46.24×10^{-9})^[20-21]。由于天德湖公园位于城南郊区, 周边污染源相对较少, 环境空气中 VOCs 主要来源于上风向下风向迁移的影响。公园路点位位于老城区中心, 人口密集, 车流量大, 汽车尾气排放使得该点位 $\varphi(\text{VOCs})$ 与天德湖公园相比更高。

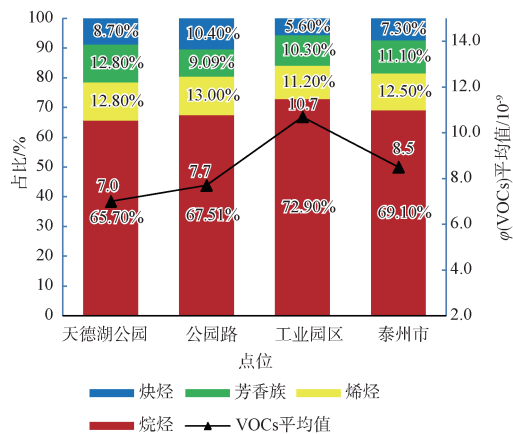


图 2 泰州市环境空气 VOCs 分布特征

监测期间 VOCs 主要化学组分平均体积分数贡献前 10 名的物质见表 1。由表 1 可见, 烷烃中贡献较大的为: 丙烷、乙烷、异戊烷。甲苯、苯是芳香烃中浓度较高的 2 个组分。泰州地区夏季环境空气中 VOCs 以烷烃类为主。汽车尾气为低碳烷烃类有机物的主要来源, 其中正己烷是汽车尾气排放的特征组分, 而丙烷、正丁烷、异丁烷在液化石油气中含量较高^[12], 低碳烯烃主要来自于工业溶剂使用、燃烧等过程^[13]。芳香烃主要来源于汽车尾气、有机溶剂的挥发、石化行业、涂料加工等^[14]。

表 1 VOCs 主要化学组分平均体积分数贡献前 10 名的物质^① / 10^{-9}

组分	天德湖公园			公园路			工业园区		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
总挥发性有机物 (TVOCs)	1.7	32.3	7.0	1.3	21.9	7.7	1.8	46.9	10.7
乙烯	0.2	3.1	0.6	0.2	2.0	0.6	—	2.6	0.6
乙炔	—	4.3	0.6	—	7.9	0.8	—	1.9	0.5
乙烷	0.4	3.2	1.1	0.5	3.4	1.2	0.4	2.6	1.0
丙烷	0.3	3.9	1.2	—	6.4	1.8	0.4	3.3	1.1
异丁烷	0.3	1.5	0.6	—	1.2	0.5	—	9.5	0.6
正丁烷	—	2.1	0.4	—	1.9	0.5	—	13.6	0.7
异戊烷	—	4.2	0.4	—	1.6	0.4	—	37.8	1.8
正己烷	—	3.5	0.4	—	10.4	0.5	—	19.8	0.8
苯	—	1.1	0.2	—	1.2	0.2	—	1.4	0.3
甲苯	—	3.5	0.3	—	1.0	0.2	—	6.2	0.6

①—表示该组分浓度低于方法检出限。

2.2 OFP 化学组成特征

OFP 是综合评价 VOCs 中各组分对 O_3 生成贡献的指标, 可用于评估该地区 VOCs 在 O_3 生成中的

作用^[15]。选取 MIR 较高的 9 种 VOCs, 计算其 OFP。不同监测点位 OFP 化学组成见表 2。由表 2 可见, 天德湖公园点位 OFP 化学组成排名前 5 的组分为: 乙烯、甲苯、异戊烷、异丁烷、丙烷; 公园路点位 OFP 化学组成排名前 5 的组分为: 乙烯、甲苯、异戊烷、丙烷、异丁烷; 工业园区点位 OFP 化学组成排名前 5 的组分为: 异戊烷、甲苯、乙烯、正己烷、异丁烷和正丁烷(并列)。由此可见, 泰州地区夏季 O₃ 生成的关键组分为: 乙烯、甲苯、异戊烷、异丁烷、丙烷。其中, 乙烯主要来自工业溶剂使用、燃烧等过程, 正丁烷、异丁烷在液化石油气中含量较高, 甲苯主要来自汽车尾气排放、工业生产。乙烯占 VOCs 体积分数尽管不是最高, 但由于其反应活性相对较强, 极易被环境空气中的氧化性组分氧化, 最终生成 O₃。这与郑州、深圳、桂林、廊坊等主要城市大气 VOCs 监测中 OFP 贡献最高的芳香烃化合物有所不同^[20], 可能是由于城市之间发展规模、产业结构不同引起的。因此, 泰州地区夏季应重点控制乙烯、甲苯和烷烃的排放。

表 2 不同监测点位 OFP 化学组成 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

组分	天德湖公园		公园路		工业园区	
	MIR	OFP	MIR	OFP	MIR	OFP
乙烯	7.40	5.5	7.40	5.5	7.40	5.5
乙烷	0.25	0.4	0.25	0.4	0.25	0.4
丙烷	0.48	1.2	0.48	1.8	0.48	1.0
异丁烷	1.21	1.8	1.21	1.6	1.21	1.8
正丁烷	1.02	1.0	1.02	1.3	1.02	1.8
异戊烷	1.38	1.9	1.38	1.9	1.38	8.0
正己烷	0.58	0.8	0.58	1.2	0.58	1.9
苯	0.42	0.3	0.42	0.3	0.42	0.3
甲苯	2.70	3.3	2.70	2.1	2.70	6.6

2.3 VOCs 典型组分比值

苯系物的排放主要来自汽车尾气、溶剂使用、燃料燃烧等^[16]。 $\varphi(\text{苯})/\varphi(\text{甲苯})$ 可用于初步判断苯系物的来源。当 $\varphi(\text{苯})/\varphi(\text{甲苯})$ 在 0.5 左右时, 苯系物主要来源于汽车尾气, 当 $\varphi(\text{苯})/\varphi(\text{甲苯}) > 0.5$ 时, 苯系物主要来自燃料燃烧, 当 $\varphi(\text{苯})/\varphi(\text{甲苯}) < 0.5$ 时, 苯系物主要来源于有机溶剂的使用。各监测点苯与甲苯体积分数比值见图 3, 图中 m 表示纵坐标与横坐标所示组分体积分数比值。由图 3 可见, 公园路点位 $\varphi(\text{苯})/\varphi(\text{甲苯})$ 为 0.57, 表明该区域苯系物主要来自汽车尾气。这

与该点位处在老城区中心, 交通密集, 周边车辆较多的情况相一致。天德湖公园与工业园区点位 $\varphi(\text{苯})/\varphi(\text{甲苯}) < 0.5$, 表明这 2 个点位苯系物除了受汽车尾气影响, 还受到有机溶剂挥发的影响。

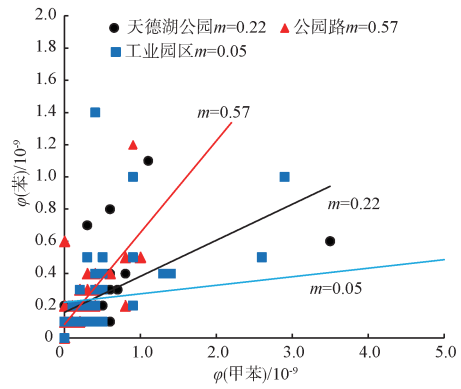


图 3 各监测点苯与甲苯体积分数比值

乙苯和二甲苯主要来自汽车尾气和溶剂挥发。利用 $\varphi(\text{二甲苯})/\varphi(\text{乙苯})$ 可以研究该地区气团老化程度。 $\varphi(\text{二甲苯})/\varphi(\text{乙苯})$ 越高, 该地区气团老化程度越低, 污染物更多地来自本地排放; 反之表明气团呈现老化趋势, 污染物来自迁移传输^[17]。各监测点二甲苯与乙苯体积分数比值见图 4。

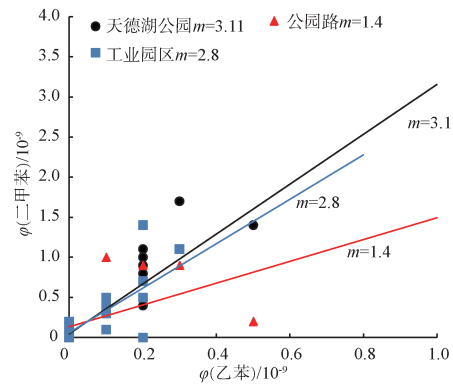


图 4 各监测点二甲苯与乙苯体积分数比值

由图 4 可见, 各监测点位 $\varphi(\text{二甲苯})/\varphi(\text{乙苯})$ 在 1.4 ~ 3.1。其中, 公园路点位 $\varphi(\text{二甲苯})/\varphi(\text{乙苯})$ 最低, 表明该区域苯系物的污染除了受本地排放影响之外, 还来自污染物的迁移传输。天德湖公园与工业园区点位气团较为新鲜, 大气中苯系物污染主要来自本地排放。

各监测点异戊烷与正戊烷体积分数比值见图 5。

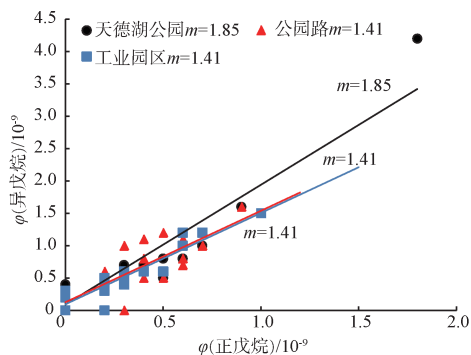


图 5 各监测点异戊烷与正戊烷体积分数比值

由图 5 可见,各监测点位 φ (异戊烷)与 φ (正戊烷)相关性均较好,说明监测区域异戊烷与正戊烷来源较为稳定。研究表明,戊烷主要来自汽车尾气、燃料或者有机溶剂的挥发, φ (异戊烷)与 φ (正戊烷)的比值往往表示其不同来源。当 φ (异戊烷)/ φ (正戊烷)约为 2.93 时,表现为汽车尾气排放特征;当 φ (异戊烷)/ φ (正戊烷)约为 0.56 ~ 0.80 时,表现为燃料燃烧特征。当 φ (异

戊烷)/ φ (正戊烷)约为 1.5 ~ 3.0 以及 1.8 ~ 4.6 时,表现为有机溶剂或燃料的挥发特征。天德湖公园、公园路、工业园区的 φ (异戊烷)/ φ (正戊烷)分别为 1.85, 1.41, 1.41,说明监测期间,3 个点位的异戊烷与正戊烷主要来自有机溶剂或燃料的挥发。

2.4 VOCs 健康风险评估结果

在检测出的 VOCs 中有 6 种组分包含在 US EPA 公布的有害空气污染物名单中^[18],分别为苯、甲苯、乙苯、间/对二甲苯、邻二甲苯、正己烷,其中苯为国际癌症研究机构认定的 1 类致癌物质。利用公式(2)~(5)计算得到致癌及非致癌风险值,见表 3。由表 3 可见,泰州地区夏季环境空气中 VOCs 的暴露浓度(EC)在 0.5 ~ 3.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;非致癌风险危害商(HQ)在 $1.6 \times 10^{-4} \sim 0.03$ 。一般认为,HQ > 1 时存在非致癌类风险^[19],HQ ≤ 1 时非致癌类风险较小。 $R > 1 \times 10^{-6}$ 时,致癌风险较高; $R < 1 \times 10^{-6}$ 时,致癌风险较小或无致癌风险。

表 3 监测点位环境空气中 VOCs 健康风险评价

组分	EC/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)			RFC/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	IUR/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) ⁻¹	HQ			R		
	天德湖 公园	公园 路	工业 园区			天德湖 公园	公园 路	工业 园区	天德湖 公园	公园 路	工业 园区
正己烷	1.5	1.9	3.1	0.7		2.1×10^{-3}	2.7×10^{-3}	4.4×10^{-3}			
苯	0.7	0.7	1.0	0.03	7.8×10^{-6}	0.02	0.02	0.03	5.5×10^{-6}	5.5×10^{-6}	7.8×10^{-6}
甲苯	1.2	0.8	2.5	5.0		2.4×10^{-4}	1.6×10^{-4}	5.0×10^{-4}			
乙苯	0.5	0.5	0.5	1.0		5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}			
间对二甲苯	0.9	0.9	0.9	0.1		9.0×10^{-3}	9.0×10^{-3}	9.0×10^{-3}			
邻二甲苯	0.5	0.9	0.9	0.1		5.0×10^{-3}	9.0×10^{-3}	9.0×10^{-3}			
HI						4.0×10^{-2}	4.5×10^{-2}	5.7×10^{-2}			

3 个监测点位 VOCs 非致癌类风险均较低,处于安全范围内,其中检出组分中苯的 HQ 值最高。3 个点位苯的致癌风险均高于安全限值,说明泰州地区夏季 VOCs 中的苯对人体有一定的致癌风险,长期暴露其中可能对人群健康造成一定危害。苯的致癌和非致癌风险在监测点位中均为最高,应重点关注苯的来源与排放。

3 结论

(1)3 个监测点位环境空气中 φ (VOCs)范围为 $1.3 \times 10^{-9} \sim 46.9 \times 10^{-9}$,平均值为 8.5×10^{-9} 。烷烃在 VOCs 中所占比例最大。各点位 VOCs 平均

值依次为工业园区 > 公园路 > 天德湖公园。泰州地区夏季环境空气中 VOCs 以烷烃类为主。

(2)泰州地区环境空气中夏季 O_3 生成的关键组分为:乙烯、甲苯、异戊烷、异丁烷、丙烷。OFP 中贡献最大的物质为乙烯。泰州地区夏季应重点控制乙烯、甲苯和烷烃的排放。

(3)通过典型组分比值可判断,公园路监测点位受汽车尾气排放影响较大,其余 2 个点位除了受汽车尾气排放还受到有机溶剂挥发的影响。除公园路点位外,其余 2 个点位受本地污染主导。

(4)泰州地区各监测点位夏季 VOCs 非致癌类风险均较低,处于安全范围内。但苯对人体有一定

的致癌风险,长期暴露其中可能对人群健康造成一定危害。夏季应加强对苯的来源监控,建议进行有针对性的控制,例如重点加强相关企业尾气中苯系物处理装置的更新与完善。

[参考文献]

- [1] 李莉娜,赵长民,潘本锋,等. 我国大气光化学烟雾污染现状与监测网络构建建议[J]. 中国环境监测, 2018, 34(5): 83-87.
- [2] BARLETTA B, MEINARDI S, ROWLAND F S, et al. Volatile organic compounds in 43 Chinese cities [J]. Atmospheric Environment, 2005(39): 5979-5990.
- [3] CHENG L, FU L, ANGLE R P, et al. Seasonal variations of volatile organic compounds in Edmonton, Alberta [J]. Atmospheric Environment, 1997, 31(2): 239-246.
- [4] 李丽娟. 朔州市城区大气挥发性有机物的特征研究及来源解析[D]. 山西:太原理工大学, 2015.
- [5] 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.
- [6] 张敬巧,吴亚君,李慧,等. 廊坊开发区秋季 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(8): 3186-3192.
- [7] LI L Y, XIE S D, ZENG L M, et al. Characteristics of volatile organic compounds and their role in ground-level ozone formation in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. Atmospheric Environment, 2015, 113(12): 247-254.
- [8] YUAN B, SHAO M, LU S H, et al. Source profiles of volatile organic compounds associate with solvent use in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(15): 1919-1926.
- [9] WU W J, ZHAO B, WANG S X, et al. Ozone and secondary organic aerosol formation potential from anthropogenic volatile organic compounds emissions in China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 53(3): 224-237.
- [10] 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.
- [11] 练川,周江,陈思琳,等. 贵阳市某工业园区环境空气中 VOCs 的污染特征与健康风险评价[J]. 环境工程, 2018, 36(7): 161-164, 154.
- [12] 温彦平,闫雨龙,李丽娟,等. 太原市夏季挥发性有机物污染特征及来源分析[J]. 太原理工大学学报, 2016, 47(3): 331-336.
- [13] CAI C J, GENG F H, TIE X X, et al. Characteristics and source apportionment of VOCs measured in Shanghai, China [J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(38): 5005-5014.
- [14] 魏巍,王书肖,郝吉明,等. 中国涂料应用过程挥发性有机物的排放计算及未来发展趋势预测[J]. 环境科学, 2009, 30(10): 2809-2815.
- [15] 虞小芳,程鹏,古颖纲,等. 广州市夏季 VOCs 对臭氧及 SOA 生成潜势的研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 830-837.
- [16] 王倩,王红丽,周来东,等. 成都市夏季大气挥发性有机物污染及其对二次有机气溶胶生成的贡献[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(7): 6-12.
- [17] XUE Y G, HO S S H, HUANG Y, et al. Source apportionment of VOCs and their impacts on surface ozone in an industry city of Baoji, Northwestern China [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 9979.
- [18] 周裕敏,郝郑平,王海滨. 北京城乡结合地空气中挥发性有机物健康风险评价[J]. 环境科学, 2011, 32(12): 3566-3570.
- [19] 蒋建宏,蔡卓,廖平德,等. 南宁市环境空气中挥发性有机物污染特征与健康风险评价[J]. 江西农业学报, 2016, 28(2): 96-100.
- [20] 银媛媛,文建辉,张旭峰,等. 桂林市城区大气 VOCs 污染特征及对 O₃ 和 SOA 的生成潜势[J]. 中国环境监测, 2020, 36(4): 29-35.
- [21] 段佳鹏,梁胜文,李蒲,等. 武汉城区秋季大气挥发性有机物污染特征及部分物种来源的初步分析[J]. 环境监测管理和技术, 2017, 29(4): 23-27.

栏目编辑 周立平 谭艳