

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第2期

Vol.39 No.2

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

特别策划:挥发性有机污染物(VOCs)排放特征、减排控制、环境政策研究专辑(III)

序	郝郑平(477)
我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响	陈天增,葛艳丽,刘永春,贺泓(478)
基于 PMF 量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响:以南京市江北工业区为例	胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)
南京工业源挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估	张玉欣,安俊琳,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(502)
某工业园区 VOCs 臭氧生成潜势及优控物种	武蕾丹,王秀艳,杨文,郭风艳,刘锦(511)
某石化工业园区秋季 VOCs 污染特征及来源解析	胡天鹏,李刚,毛瑶,郑煌,秦世斌,闵洋,张家泉,邢新丽,祁士华(517)
某典型石化工业园区冬季大气中 VOCs 污染特征	毛瑶,李刚,胡天鹏,郑煌,安艺伟,闵洋,邢新丽,祁士华(525)
杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征	卢滨,黄成,卢清,杨强,井宝莉,夏阳,唐伟,顾泽平(533)
秦皇岛市工业行业挥发性有机物排放特征	虎啸宇,刘航,王乃玉,王灿,揣莹(543)
浙江省汽摩配行业挥发性有机物排放特征及排放系数	杨忠平,王浙明,何志桥,徐志荣,滕富华,张华岳(551)
汽车制造企业恶臭来源及影响分析	石田立,张伟霞,陈小方,张嘉妮,梁小明,范丽雅,叶代启(557)
典型酿造业厂界无组织排放 VOCs 污染特征与风险评价	高占啟,胡冠九,王荃,朱冰清,陈素兰(567)
成都市大气环境 VOCs 污染特征及其健康风险评价	李友平,唐娅,范忠雨,蒲敏,章金莲,杨铮铮,吴大磊(576)
上海市住宅区儿童卧室中甲醛和苯系物浓度的现场检测分析	蒋巧云,刘平平,王雪颖,路荣春,刘炜,周华元,龚莹莹,周亚欣,黄晨(585)
江苏省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	夏思佳,刘倩,赵秋月(592)
江门市人为源挥发性有机物排放清单	陈小方,张伟霞,陈柄旭,张嘉妮,范丽雅,叶代启(600)
长江三角洲 2014 年天然源 BVOCs 排放、组成及时空分布	刘岩,李莉,安静宇,张伟,严茹莎,黄凌,黄成,王红丽,王卿,王敏(608)
北京城市副中心(通州区)加油站 VOCs 排放清单	黄玉虎,胡玮,李贝贝,纪旋,肖宇,任碧琪,秦建平(618)
公交车使用废食用油制生物柴油的污染物排放及 VOCs 成分谱	胡志远,林骝骑,黄成,王红丽,景盛翱,楼狄明(626)
生物滴滤塔净化甲基叔丁基醚废气的研究	褚其英,姚露露,吕雄标,叶杰旭,叶虹霓,潘梁柱,陈建孟,陈东之(633)
低温等离子体-生物耦合系统对复合 CVOCs 的降解	郭海倩,缪晶晶,姜理英,张迪(640)
水质异味期间钱塘江杭州段表层水体中挥发性和半挥发性有机物污染特征及健康风险评价	陈峰,唐访良,徐建芬,王奕奕,阮东德,张伟,周姗(648)
城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征	许美佳,王海亮,李春梅,徐雄,王东红(655)
不同通勤模式暴露于 VOCs 的健康风险评价	佟瑞鹏,张磊(663)
家具制造过程中 VOCs 的来源分析及环境健康风险评价	佟瑞鹏,张磊,杨校毅,朱旭波,任传耕(672)
北京市 PM _{2.5} 时空分布特征及其与 PM ₁₀ 关系的时空变异特征	杨文涛,姚诗琪,邓敏,王艳军(684)
小型池塘水-气界面 CH ₄ 冒泡通量的观测	张秀芳,肖薇,张弥,王伟,赵佳玉,胡勇博,谢成玉,张圳,谢燕红,黄文晶(691)
中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险	王鑫璇,张鸿,王艳萍,罗骥(703)
铁岭市河流氮素时空分布及源解析	杨丽标,雷坤,乔飞,孟伟(711)
基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体 CDOM 特征	刘堰杨,秦纪洪,刘琛,孙辉,唐翔宇,范诗雨(720)
宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价	徐美娟,鲍波,陈春燕,王永川,高夫燕,虞效益(729)
巢湖水体可溶态重金属时空分布及污染评价	吴蕾,刘桂建,周春财,刘荣琼(738)
广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性	蓝小龙,宁增平,肖青相,黄正玉,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(748)
内电解人工湿地冬季低温尾水强化脱氮机制	郑晓英,朱星,王菊,周翔,徐亚东,韦诚,高雅洁,周敏(758)
河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程	徐雅倩,徐飘,杨正健,刘德富,马骏(765)
降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析	刘心愿,宋林旭,纪道斌,刘德富,崔玉洁,黄佳维,赵冲,唐咏春,平明明(774)
城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系	梁晓东,余杨,张敏,段龙飞,彭文启(783)
三峡库区兰陵溪流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征	张林,黄志霖,肖文发,曾立雄,宋文梅(792)
基于污染评价的地下水中优控污染物筛选	赵鹏,何江涛,王曼丽,黄德亮,王磊,梁雨(800)
硫和石英砂比对自养填充床反应器去除高浓度高氯酸盐的影响	陶华强,邵冬海,张超,宋圆圆,逯彩彩,郭建博(811)
活性炭/高分子复合水凝胶对水中亚甲基蓝和 Cu(II) 的去除性能	孔岩,庄媛,石宝友,韩志勇,郝昊天,韩昆,于建伟(819)
三维网状 HZO@SGH 对水中氟离子的吸附作用和机制	马福臻,周少奇,刘泽琚,支亮亮,周璇(828)
MgO/活性炭催化臭氧氧化降解有机物的作用机制	许珊珊,林存旺,丁亚磊,童少平(838)
污水厂二级出水中难降解有机物的臭氧化特性	侯瑞,金鑫,金鹏康,苟邦耀,王晓昌(844)
染料探针技术对二级出水中优势污染物的定量检测	孟晓荣,王穗桢,王磊,王旭东,乔茹凯,任婷婷,唐卫婷(852)
污水处理厂厌氧氨氧化工艺小试	李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏泽,张杰(859)
间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响	刘宏,南彦斌,李慧,王翔,彭永臻,陈永志(865)
好氧/除磷颗粒对亚硝化颗粒污泥启动的影响	李冬,郭跃洲,曹美忠,张泽文,李帅,张杰(872)
处理垃圾渗滤液的 SBR 中微生物种群与污泥比阻	蔡丽云,黄泽彬,须子唯,江志斌,林莉莉,黄宇(880)
基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评价	姚宏,张士超,刘明丽,王静,鲁根涛,于晓华(889)
西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价	刘畅,宋波,张云霞,雷梅,田美玲,余元元,庞瑞(899)
开封城市土壤磷素组成特征及流失风险	白秀玲,马建华,孙艳丽,刘德新(909)
电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价	尹伊梦,赵委托,黄庭,程胜高,赵珍丽,余葱葱(916)
上海市稻米中有机氯农药残留水平及健康风险评价	孟媛,刘翠翠,仇雁翎,周轶慧,朱志良(927)
四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征	迟荪琳,王卫中,徐卫红,李桃,李彦华,张春来(935)
硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控	李园星露,叶长城,刘玉玲,李丹阳,刘寿涛,罗海艳,刘孝利,铁柏清,孙健(944)
电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析:以清远市龙塘镇为例	严晓,李淑圆,王美欢,许榕发,郑晶,任明忠(953)

成都市大气环境 VOCs 污染特征及其健康风险评价

李友平¹, 唐娅¹, 范忠雨¹, 蒲敏¹, 章金莲¹, 杨铮铮¹, 吴大磊²

(1. 西华师范大学环境科学与工程学院, 南充 637009; 2. 广东省社会科学院环境经济与政策研究中心, 广州 510610)

摘要: 于 2012 年 9 月, 在成都市分别选取代表城市大气环境和路边大气环境的两个采样点对大气中挥发性有机物 (VOCs) 进行采样, 对不同大气环境中 VOCs 的浓度水平与变化特征、组成和反应活性进行分析, 并对其中的芳香烃化合物进行健康风险评价。结果表明, 成都市城市大气环境和路边大气环境中 TVOCs 的平均质量浓度分别为 $(108.57 \pm 52.43) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(132.61 \pm 49.31) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 不同大气环境中各烃类物质浓度均呈现出烷烃 > 芳香烃 > 烯烃 > 炔烃的趋势; 城市和路边大气环境中芳香烃和烯烃对臭氧生成潜势 (OFP) 贡献较大, 关键物种均为间/对二甲苯、甲苯、乙烯、邻二甲苯和丙烯; 不同大气环境中的苯、甲苯、乙苯和二甲苯 (BTEX) 对人体的非致癌风险和危害指数均小于 1, 对暴露人群不存在非致癌风险; 致癌物质苯对人体的致癌风险高于安全阈值 $1.00\text{E}-06$, 对暴露人群可能存在致癌风险。

关键词: 挥发性有机物; 污染特征; 臭氧生成潜势; 健康风险评价; 成都市

中图分类号: X511; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)02-0576-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201701057

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu

LI You-ping¹, TANG Ya¹, FAN Zhong-yu¹, PU Min¹, ZHANG Jin-lian¹, YANG Zheng-zheng¹, WU Da-lei²

(1. College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637009, China; 2. Center for Environmental Economics and Policy Research, Guangdong Academy of Social Science, Guangzhou 510610, China)

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) were measured in atmospheric samples collected from urban and roadside atmospheric environments in Chengdu in September 2012. The composition, chemical reactivity, and concentration level and its variation characteristics of VOCs were studied, and the health risk of aromatic compounds was assessed. Results showed that the mean mass concentrations of total VOCs (TVOCs) were $(108.57 \pm 52.43) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $(132.61 \pm 49.31) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ for the urban and roadside atmospheric environments, respectively. The highest mass concentrations were observed for alkanes, followed by aromatics, alkenes, and alkynes. Aromatics and alkenes contributed more to ozone formation potential (OFP) of the urban and roadside atmospheric environments, and *m/p*-xylene, toluene, ethene, *o*-xylene, and propene were the key reactive species. The values of hazard quotient and hazard index were less than 1 for benzene, toluene, ethylbenzene, and *o*-xylene (BTEX), showing that they had no appreciable risk of non-cancer health effects on the exposed population. However, the value of cancer risk was above the safety threshold for benzene, showing that it was a potential cancer risk to the exposed population.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); pollution characteristics; ozone formation potential; health risk assessment; Chengdu

城市化进程加快使挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, VOCs) 的组成变得越来越复杂^[1]。VOCs 主要来自与化石燃料燃烧有关的交通和工业排放、有机溶剂挥发、化石燃料燃烧时的蒸发损失和自然源排放等^[2~5]。很多 VOCs 不仅自身有较强的致畸、致癌和毒性, 能通过呼吸和皮肤直接接触等方式进入人体, 对人体造成急性或者慢性伤害^[6~8]; 更重要的是 VOCs 作为前体物, 在光化学反应作用下, 能与氮氧化合物和氢氧自由基等生成 O_3 和二次有机气溶胶等一系列二次产物, 这些产物会造成大气光化学烟雾和灰霾等许多环境问题, 导致区域大气复合污染^[9~12]。VOCs 的污染特征、组成、时空变化、对二次产物生成贡献、来源和对人体的健康风险等内容成为研究重

点^[13~15]。目前, 我国对 VOCs 的相关研究主要在珠三角、长三角和京津冀等地区展开, Cai 等^[16]对上海市 VOCs 研究表明, VOCs 的组成主要为烷烃和芳香族化合物, 主要来源于交通源、工业源、燃料挥发、溶剂的使用以及生物质和煤燃烧等; Louie 等^[17]对珠三角地区 VOCs 的研究表明, 芳香烃和烯烃对 O_3 生成的贡献率达到 80%; Li 等^[18]于 2012 年对北京的 BTEX 健康风险的研究结果表明, BTEX 不存在非致癌健康风险, 但苯可能存在

收稿日期: 2017-01-08; 修订日期: 2017-06-21

基金项目: 四川省科技厅项目 (2015JY0094, 2017KZ0041); 化学合成与污染控制四川省重点实验室项目 (CSPC2014-4-2)

作者简介: 李友平 (1979~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为大气污染防治、环境教育, E-mail: lyp920@163.com

致癌风险。

成都市位于四川盆地西部,四川省省会城市,成渝经济区的中心城市,人口超过1 000万。近年来,成都地区大气环境中 VOCs 的相关问题研究已逐步开展,印红玲等^[19]于 2011~2012 年对成都市不同功能区大气中 VOCs 浓度的季节变化和 OFP 研究表明,VOCs 的浓度变化为秋季最高而冬季最低,不同功能区 VOCs 浓度和 OFP 的大小均为交通居民混合区>工业区>风景区;王倩等^[20]于 2014 年夏季对成都市区和工业区的 VOCs 进行采集分析,结果表明两功能区 VOCs 的浓度相近,VOCs 浓度受汽车尾气的影响,芳香烃和烯烃是影响化学反应活性的关键组分。继续对成都地区大气 VOCs 的污染问题进行不同方向的研究有着重要的现实意义,本研究通过对成都市城市和路边大气环境进行采样,分析在不同的城市大气环境中 VOCs 的污染特征和对 O₃ 生成的贡献,并对单环芳香烃中的苯、甲苯、乙苯和二甲苯(BTEX)进行健康风险评价,以期在成都大气环境问题治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点介绍

此次 VOCs 采样设有城市大气环境和路边大气环境两个采样点,其中,城市大气环境采样点位于成都市青羊区一高层建筑楼顶(约 60 m),采样点周围无建筑物遮挡,无明显污染源,能很好地代表成都市城市大气环境;路边采样点则位于成都市锦江区人民南路和一环南路,通过摄影机记录表明,采样期间两路段每小时平均车流量为 2 002 辆。

1.2 采样方法

采样时间为 2012 年 9 月 13~20 日,每天采样时间都选择在 08:00~10:00 和 17:00~20:00 两个交通出行高峰段,两采样点每天各采集一个样品,采样期间两采样点各采集到 6 个有效样品。此次 VOCs 采样利用不锈钢罐采集,采样罐内壁做惰化处理,抽成真空。每次采样时,在采样罐进气阀前装一个限流阀,大气经限流阀进入采样罐内,直至采满,每次采样 1 h。路边采样时,采样罐进气口离地面约 1.5 m,离道路 2 m,且采样时周围无明显排放源。

1.3 样品分析

使用 Entech 7100 预浓缩系统(Entech

Instruments Inc, California, USA)和 Agilent 5973N 气相色谱-质谱/氢火焰检测器/电子俘获检测器(GC-MSD/FID/ECD, Agilent Technologies, USA)对 VOCs 进行分析。分析时,样品经预浓缩系统三级冷阱捕集进行浓缩富集后样品进样到 GC-MSD/FID/ECD 系统,在色谱系统中,样品经毛细管色谱柱分成三路分别被 MSD、FID 和 ECD 检测,分析过程详见文献[21]。

使用 PAMS 标准混合气体(Spectra Gases, USA)建立 5 个不同浓度梯度的标准曲线,目标化合物的相关系数在 0.992~0.999 之间。为确保分析系统检测准确性,每天分析样品前都先分析一个纯氮样品,然后再分析一个标准样品来检测仪器状态,结果与初始标准曲线的误差不超过 10%,否则重新校准标准曲线。仪器分析的精度为 5%,准确度为 5%。

1.4 OFP 计算方法

VOCs 作为 O₃ 生成的前体物,对 O₃ 的生成有重要的作用,但由于不同的 VOCs 物种的光化学反应活性差别较大,对 O₃ 生成的贡献也不同。所以对各 VOCs 物种的 OFP 进行分析研究,找出贡献较大的 VOCs 物种对控制 O₃ 生成有重要意义。OFP 的计算公式为:

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

式中,OF_{P_i}为某 VOC 物种 *i* 的臭氧生成潜势,单位为 μg·m⁻³; *c*(VOC)_{*i*}为某物种 *i* 的浓度,单位为 μg·m⁻³; MIR_{*i*}为某 VOCs 物种 *i* 的最大增量活性系数,其常被用来评估各 VOCs 组分对 OFP 的贡献, MIR 同时考虑 VOCs 物种反应动力学和机制反应活性,综合反映各 VOC 的反应活性及对 OFP 的不同影响,本研究使用文献[22]中的 MIR 值。

1.5 健康风险评价方法

根据污染物是否具有致癌性,通常将健康风险评价分为非致癌健康风险评价和致癌健康风险评价,本研究利用美国环境保护署(EPA)在 2009 年针对在特定场所吸入途径污染物的健康风险评价新方法(EPA-540-R-070-002),以成都市不同大气环境中的苯、甲苯、乙苯、二甲苯为研究对象,对其进行健康风险评价。通过计算非致癌指数和苯吸入途径的致癌风险指数,来评估成都市大气环境中 VOCs 存在的风险。其计算公式为:

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

$$HQ = \frac{EC}{RfC \times 1000} \quad (3)$$

$$HI = \sum HQ_i \quad (4)$$

$$Risk = EC \times IUR \quad (5)$$

式中, EC 为慢性和亚慢性时的浓度, 单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; CA 为污染物的环境浓度, 单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; ET 为暴露时间, 单位为 $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$, 取值为 24; EF 为暴露频率, 单位为 $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$, 取值为 365; ED 为暴露时间, 单位为 a, 取值为 70; AT 为平均时间, 单位为 h, 取值为 $70 \times 365 \times 24$; HQ 为非致癌风险危害商值; RfC 为参考浓度, 单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; HI 为危害指数, 为多种污染物非致癌风险危害商值的总和; Risk 终身致癌风险值; IUR 为单位吸入致癌风险, 单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. RfC 和 IUR 的值来源于文献[23].

2 结果与讨论

2.1 成都大气 VOCs 组成特征

本次共分析出 59 种 VOCs, 从组成来看, 包括烷烃 29 种, 芳香烃 17 种, 烯烃 12 种, 炔烃 1 种. 表 1 为此次检测出的各污染物的浓度变化范围、平均值和标准偏差. 成都市两个大气采样点之间各化合物浓度及总 VOCs 浓度之间存在较大差异. 城市大气环境和路边大气环境中 TVOCs 的平均浓度分别为 $(108.57 \pm 52.43) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(132.61 \pm 49.31) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 变化范围较大, 分别为 $45.93 \sim 169.15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $73.80 \sim 213.07 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 印红玲等^[19]于 2012 年 8 月 23 ~ 24 日在成都市城区对 VOCs 进行采样分析, 得到 TVOCs 浓度为 $106 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与本研究的结果相似.

城市大气环境中浓度最高的 5 种物种分别为甲苯、间/对二甲苯、异戊烷、苯和乙烷, 5 种污染物浓度达到 $48.64 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占 TVOCs 浓度的 44.80%; 路边大气环境中浓度最高的 5 种物种分别为甲苯、乙烷、异戊烷、间/对二甲苯和苯, 5 种污染物浓度为 $56.97 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占 TVOCs 浓度的 42.96%. 虽然顺序略微不同, 但是城市大气和路边大气中浓度最高的 5 种物种相同, 可以认为这 5 种物种是成都大气环境中的优势 VOCs. 异戊烷被认为是机动车汽油燃料挥发的示踪物^[24,25]; 路边大气中乙烷的浓度较大, 作为天然气示踪物^[26], 可能来自 CNG 汽车的尾气排放, 与成都大力推动清洁能源 CNG 汽车有关; 苯、甲苯和间/对二甲苯的来源较为广泛, 部分来源被认为与交通源排放有

关^[27,28]. 可以看出, 交通源排放对成都市大气环境中 VOCs 有较大贡献.

图 1 是成都市城市和路边两种大气环境中 VOCs 的 4 类烃类物质构成, 可以看出, 两种不同大气环境都呈现出烷烃 > 芳香烃 > 烯烃 > 炔烃的规律, 烷烃和芳香烃均为其主要组成, 城市和路边大气环境中各烃类物质的浓度分别为 47.08、44.25、11.53 和 $5.71 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 及 65.07、47.09、14.33 和 $6.12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 路边大气环境的烷烃远高于城市大气环境, 芳香烃、烯烃和炔烃略高于城市大气环境.

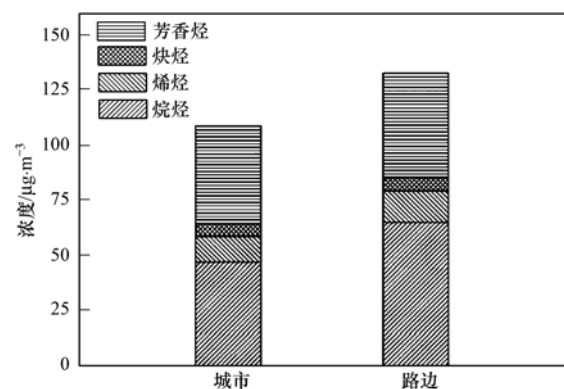


图 1 成都路边和城市大气环境中挥发性有机化合物的构成

Fig. 1 Composition of VOCs in the roadside and urban atmospheric environments in Chengdu

表 2 是成都不同大气环境中部分 VOCs 物种浓度与国内外其他研究的对比, 主要包括一些短链烷烃和短链烯烃, 乙炔及 BTEX, 其中广州^[22]、北京^[29]、太原^[30]、日本洲本^[31]和日本东京^[32]的采样区域为城区, 厦门^[33]的采样区域为城市交通区域. 从中可知, 成都路边大气中乙烷浓度高过所有对比城市, 为对比城市的 1.9 ~ 5.8 倍. 在成都, CNG 燃料的大规模推广, 使用 CNG 燃料的机动车大量增加, 可能是路边大气环境中乙烷含量较高的原因, 而成都城市大气环境中乙烷浓度除低于太原外, 也都高于其他对比城市, 显示出较高的浓度水平; 成都路边大气和城市大气中丙烷、正丁烷和异丁烷这 3 种物种的浓度水平与太原和厦门相当, 低于广州、北京、日本洲本和日本东京; 汽油燃料的损失或未燃是异戊烷的主要来源, 成都市路边大气和城市大气中异戊烷的水平相当, 浓度水平高于除日本东京外的所有对比城市; 乙烯、丙烯、异戊二烯和乙炔的浓度水平和对比城市相比处于中等水平; 苯系物中的 BTEX 浓度高于厦门、太原和日本洲本, 与广州和北京相当, 低于日本东京. 成都不同大气

表 1 成都路边和城市大气环境中挥发性有机化合物浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 Concentrations of VOCs in the roadside and urban atmospheric environments in Chengdu/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

VOCs	城市大气			路边大气		
	浓度范围	平均值	标准偏差	浓度范围	平均值	标准偏差
乙烷	3.70 ~ 11.10	6.37	3.05	8.27 ~ 22.37	14.01	4.69
丙烷	1.94 ~ 8.56	4.25	2.70	4.35 ~ 8.96	6.40	1.96
异丁烷	2.28 ~ 9.27	5.02	2.59	4.20 ~ 7.31	5.91	1.19
正丁烷	1.47 ~ 8.40	4.05	2.91	3.53 ~ 6.97	5.17	1.59
异戊烷	3.24 ~ 21.12	10.00	7.68	5.08 ~ 14.40	9.47	3.46
正戊烷	1.06 ~ 18.44	5.81	7.22	2.16 ~ 6.01	3.84	1.33
2,2-二甲基丁烷	0.15 ~ 0.33	0.25	0.06	0.29 ~ 0.68	0.43	0.14
环戊烷	0.05 ~ 0.15	0.11	0.04	0.13 ~ 1.08	0.33	0.37
2,3-二甲基丁烷	0.19 ~ 0.84	0.45	0.24	0.50 ~ 1.28	0.74	0.29
2-甲基戊烷	0.78 ~ 2.90	1.83	0.96	2.28 ~ 5.40	3.13	1.24
3-甲基戊烷	0.49 ~ 1.96	1.20	0.62	1.44 ~ 3.36	1.96	0.71
正己烷	0.72 ~ 2.30	1.35	0.79	2.71 ~ 6.78	4.94	1.74
甲基环戊烷	0.19 ~ 1.01	0.58	0.35	0.52 ~ 1.54	0.96	0.37
2,4-二甲基戊烷	0.04 ~ 0.18	0.12	0.05	0.09 ~ 0.32	0.19	0.08
环己烷	0.15 ~ 0.58	0.32	0.17	0.39 ~ 1.04	0.63	0.22
2-甲基己烷	0.15 ~ 1.05	0.56	0.33	0.49 ~ 1.69	0.98	0.45
2,3-二甲基戊烷	0.05 ~ 0.35	0.21	0.11	0.18 ~ 0.57	0.35	0.16
3-甲基戊烷	0.44 ~ 2.20	1.05	0.80	0.91 ~ 1.86	1.36	0.40
2,2,4-三甲基戊烷	0.06 ~ 0.70	0.28	0.22	0.21 ~ 0.87	0.37	0.17
正庚烷	0.12 ~ 1.04	0.50	0.37	0.50 ~ 1.20	0.77	0.31
甲基-环己烷	0.14 ~ 1.67	0.63	0.54	0.38 ~ 1.27	0.82	0.37
2,3,4-三甲基戊烷	0.03 ~ 0.08	0.05	0.02	0.03 ~ 0.12	0.06	0.04
2-甲基庚烷	0.06 ~ 0.28	0.16	0.07	0.17 ~ 0.61	0.32	0.16
3-甲基庚烷	0.04 ~ 0.19	0.11	0.05	0.14 ~ 0.47	0.25	0.12
正辛烷	0.06 ~ 0.35	0.17	0.11	0.16 ~ 0.52	0.28	0.13
正壬烷	0.06 ~ 0.52	0.25	0.20	0.13 ~ 0.64	0.30	0.20
正癸烷	0.08 ~ 0.30	0.19	0.07	0.12 ~ 0.37	0.22	0.11
正十一烷	0.10 ~ 1.28	0.50	0.41	0.18 ~ 0.55	0.32	0.13
正十二烷	0.09 ~ 1.96	0.71	0.76	0.14 ~ 1.50	0.56	0.48
乙烯	1.65 ~ 7.41	3.64	2.58	2.41 ~ 8.09	5.28	2.05
丙烯	0.69 ~ 3.43	1.54	1.14	1.13 ~ 3.48	2.20	0.82
1-丁烯	0.28 ~ 3.35	1.80	1.78	1.38 ~ 2.34	1.82	0.34
反式-2-丁烯	0.08 ~ 2.40	0.66	0.89	0.33 ~ 1.33	0.75	0.33
顺式-2-丁烯	0.09 ~ 1.37	0.43	0.48	0.34 ~ 1.17	0.70	0.28
1-戊烯	0.10 ~ 1.97	0.55	0.72	0.19 ~ 0.68	0.39	0.16
异戊二烯	0.12 ~ 0.89	0.52	0.32	0.28 ~ 1.37	0.69	0.48
反式-2-戊烯	0.05 ~ 2.24	0.81	0.94	0.42 ~ 1.39	0.77	0.34
顺式-2-戊烯	0.08 ~ 1.38	0.43	0.53	0.25 ~ 0.61	0.36	0.13
1-己烯	0.05 ~ 0.18	0.11	0.06	0.09 ~ 0.30	0.15	0.08
α -蒎烯	0.19 ~ 1.22	0.83	0.49	0.29 ~ 2.55	0.99	0.80
β -蒎烯	0.05 ~ 0.68	0.21	0.24	0.08 ~ 0.38	0.21	0.10
乙炔	2.04 ~ 10.74	5.71	3.65	2.35 ~ 11.84	6.12	3.82
苯	2.47 ~ 16.04	8.68	6.07	4.20 ~ 15.31	8.95	4.25
甲苯	2.44 ~ 32.26	11.80	11.56	8.97 ~ 21.91	15.46	4.65
乙苯	0.90 ~ 10.27	3.34	3.66	1.05 ~ 8.12	3.19	2.72
对/间二甲苯	2.32 ~ 44.86	11.79	16.64	2.38 ~ 25.89	9.08	8.94
苯乙烯	0.15 ~ 4.05	1.74	1.48	0.18 ~ 3.80	1.27	1.38
邻二甲苯	0.88 ~ 10.64	3.38	3.72	1.13 ~ 4.77	3.38	2.87
异丙基苯	0.03 ~ 0.17	0.10	0.05	0.06 ~ 0.25	0.12	0.07
间乙基苯	0.24 ~ 1.19	0.68	0.40	0.39 ~ 2.06	0.87	0.63
对乙基苯	0.08 ~ 0.46	0.29	0.15	0.26 ~ 1.05	0.53	0.30
1,3,5-三甲基苯	0.08 ~ 0.48	0.28	0.14	0.21 ~ 1.30	0.48	0.41
邻乙基苯	0.09 ~ 0.35	0.26	0.10	0.22 ~ 0.92	0.45	0.27
1,2,4-三甲基苯	0.19 ~ 1.71	0.97	0.49	0.82 ~ 5.39	1.96	1.76
1,2,3-三甲基苯	0.11 ~ 0.67	0.39	0.19	0.26 ~ 1.68	0.70	0.52
间二乙基苯	0.04 ~ 0.15	0.08	0.05	0.03 ~ 0.21	0.07	0.07
对二乙基苯	0.03 ~ 0.31	0.17	0.11	0.07 ~ 0.50	0.21	0.15
邻二乙基苯	0.03 ~ 0.19	0.09	0.07	0.03 ~ 0.05	0.04	0.01
正丙基苯	0.07 ~ 0.37	0.21	0.11	0.17 ~ 0.68	0.34	0.20

表 2 成都市和国内外城市 VOCs 物种浓度比较/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Comparison of selected VOCs measured in Chengdu and other cities/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

物种	成都城市大气	成都路边大气	广州	北京	厦门	太原	洲本(日本)	东京(日本)
乙烷	6.37	14.01	2.95	2.43	— ¹⁾	7.43	—	—
丙烷	5.24	6.40	7.48	10.52	—	8.69	—	—
异丁烷	5.02	5.91	11.33	6.49	4.15	—	10	9.4
正丁烷	4.05	5.17	21.11	8.71	5.67	5.08	17	16
异戊烷	10.00	9.47	0.03	11.38	8.89	6.89	7.4	18
乙烯	3.64	5.28	2.15	6.13	—	4.29	—	—
丙烯	1.54	2.20	0.62	5.55	2.54	1.71	—	4.7
异戊二烯	0.52	0.69	0.40	3.55	—	1.17	—	—
乙炔	5.71	6.12	0.12	6.06	—	4.67	—	—
苯	8.68	8.95	6.84	8.37	3.98	6.49	2	4.0
甲苯	11.80	15.46	19.76	11.41	13.63	3.79	12	26
乙苯	3.34	3.19	4.26	5.41	4.48	2.04	8.1	4.9
间/对二甲苯	11.79	9.08	3.06	9.67	3.62	3.55	6.1	7.2
邻二甲苯	3.38	3.38	2.42	3.68	2.63	1.09	2.6	2.7

1) 文献中无相关数据

环境中的间/对二甲苯和邻二甲苯都显示出较高的浓度水平, 高于除北京外的所有对比城市. 总体上, 成都路边大气环境 VOCs 浓度高于城市大气环境 VOCs 浓度, 不同大气环境 VOCs 浓度处于较高水平.

苯和甲苯的比值(B/T)常用来判断苯系物的来源, 不同来源的 BTEX 浓度比值具有专一性, 因此它们之间不同的比值代表不同的来源^[34,35]. B/T 的比值在 0.5 左右表明来源为交通源; 比值大于 0.5, 则主要来源于燃煤燃烧和石油化工排放; 比值小于 0.5 时表明它们的来源为颜料和溶剂等工业排放和有机溶剂挥发^[25,34,36]. 本研究中, 城市大气环境和路边大气环境中 B/T 的比值分别为 0.74 和 0.58. 可以看出, 路边大气环境的 B/T 值非常接近 0.5, 可认为苯系物主要来自汽车尾气等交通源的排放. 结果与 Barletta 等^[25]对中国不同城市的多条道路分析出的 B/T 值 0.6 非常接近. 相比于成都路边大气

环境中 B/T 比值, 说明成都城市大气环境中的苯系物除了来自交通源排放外, 还可能来自石油化工和化石燃料的燃烧等其他来源.

2.2 VOCs 对 OFP 的贡献

VOCs 作为 O_3 生成的前体物, 对 O_3 的生成有重要作用, 但由于不同的 VOCs 物种的光化学反应活性差别较大, 对 O_3 生成的贡献也不同, 进一步分析成都不同大气环境中各 VOCs 污染物的 OFP, 识别影响成都不同大气环境 O_3 生成的重要 VOCs 物种. 分析表明, 检测期间, 成都市城市大气环境和路边大气环境平均 OFP 分别为 $(308.40 \pm 193.88) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(353.52 \pm 160.70) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 线性拟合分析表明, 成都市城市大气环境和路边大气环境中各物种平均最大 O_3 增量反应活性分别为 3.13 和 3.51, 说明路边大气环境中各物种平均最大 O_3 增量反应活性要高于城市大气环境.

表3是成都市城市 and 路边大气环境对 OFP 贡

表 3 成都市路边和城市大气环境中 O_3 生成潜势前 10 位物种

Table 3 Top 10 abundant VOC species of OFP in the roadside and urban atmospheric environments in Chengdu

城市大气			路边大气		
物种	OFP/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	占比/%	物种	OFP/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	占比/%
间/对二甲苯	77.81	25.23	间/对二甲苯	59.94	16.96
甲苯	31.87	10.33	甲苯	41.73	11.80
乙烯	26.9	8.72	乙烯	39.08	11.05
邻二甲苯	21.98	7.13	邻二甲苯	21.95	6.21
丙烯	14.49	4.70	丙烯	20.72	5.86
异戊烷	13.80	4.47	1,2,4-三甲基苯	17.28	4.89
1-丁烯	9.57	3.10	异戊烷	13.07	3.70
乙苯	9.01	2.92	1-丁烯	9.62	2.72
1,2,4-三甲基苯	8.51	2.76	乙苯	8.62	2.44
反式-2-戊烯	7.11	2.31	反式-2-丁烯	7.54	2.13
共计	221.05	71.68	共计	239.55	67.76

献最高的 10 种物种, 分别是间/对二甲苯、甲苯、乙烯、邻二甲苯、丙烯、异戊烷、1-丁烯、乙苯、1,2,4-三甲基苯和反式-2-戊烯以及间/对二甲苯、甲苯、乙苯、邻二甲苯、丙烯、1,2,4-三甲基苯、异戊烷、1-丁烯、乙苯和反式-2-丁烯。在城市和路边大气 OFP 前 10 位的物种, 两种不同大气环境中共有 9 种相同物种, 这些相同物种都在两种不同大气环境中的前 9 位, 只是顺序略有不同, 说明在成都市城市大气环境和路边大气环境中对 OFP 贡献大的 VOCs 污染物相似。从烃类构成上来看, 城市大气环境和路边大气环境 OFP 前 10 位的物种, 均有 5 种芳香烃, 4 种烯烃和 1 种烷烃。在城市大气和路边大气中, 前 10 位的 O_3 生成贡献分别占总 OFP 的 71.68% 和 67.76%。

值得注意的是, 两种大气环境中对 O_3 生成贡献前 5 位的物种都是间/对二甲苯、甲苯、乙苯、邻二甲苯和丙烯, 这是由于他们都是光化学反应活性强的物种。许多研究也显示这些物种是地面 O_3 产生的主要贡献者。Tang 等^[37]对广州市不同 VOCs 对 OFP 贡献大小进行研究, 结果表明贡献前 5 位分别为甲苯、间/对二甲苯、乙苯、丙烯和邻二甲苯。An 等^[4]对北京市不同种类的 VOCs 的 OFP 进行分析, 结果显示在一天当中的不同时段对 OFP 贡献最大的 3 个物种分别为丙烯、甲苯和间/对二甲苯。Cai 等^[16]在上海通过研究不同种类的 VOCs 对 O_3 生成潜势贡献大小的研究同样发现甲苯、间/对二甲苯和乙苯为 VOCs 对 O_3 贡献的前 3 种物种。

图 2 是成都市城市大气环境和路边大气环境中各类 VOCs 的比例和其对 OFP 的贡献率。可以看出, 不同大气环境中各类烃类物种对 OFP 的贡献均呈现出芳香烃 > 烯烃 > 烷烃 > 炔烃。烷烃的浓度虽然在城市大气环境和路边大气环境中分别占 43.37% 和 49.07%, 但其光化学活性低, 对 OFP 贡献不大, 分别只占总 OFP 的 15.57% 和 17.41%; 相反, 相较于浓度在 TVOCs 中的占比, 芳香烃和烯烃对 OFP 的贡献高于其浓度占比, 这是由于芳香烃和烯烃的动力学活性和机理活性较高, 造成其 MIR 值较大引起的, 所以相对于浓度占比, 芳香烃和烯烃对 OFP 贡献的占比高于烷烃。成都不同大气环境中的芳香烃和烯烃 OFP 贡献率之和均超过 80%, 是生成 O_3 的关键物种。

2.3 BTEX 健康风险评价

芳香烃中的 BTEX 是其重要的组成物种, 成都市城市大气环境和路边大气环境中的 BTEX 浓度分

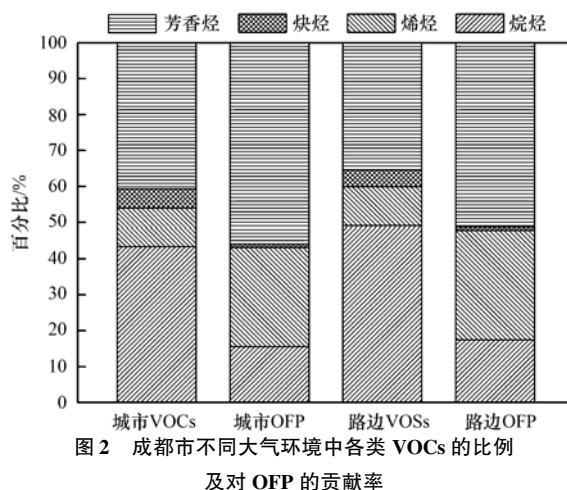


图 2 成都市不同大气环境中各类 VOCs 的比例及对 OFP 的贡献率
Fig. 2 Mixing ratios of different VOCs and VOC contributions to OFP in the roadside and urban atmospheric environments in Chengdu

别占总芳香烃浓度的 88.1% 和 85.1%, 分别占总芳香族化合物对 O_3 生成贡献的 83.7% 和 75.0%。其中甲苯的浓度最高, 城市大气环境和路边大气环境中的甲苯浓度分别占总芳香烃浓度的 26.7% 和 32.8%。BTEX 中的苯更被国际癌症研究机构认定为人类一类致癌物种。U. S. EPA 规定的非致癌风险商和致癌风险商的安全阈值分别为 1 和 $1E-06$, 利用公式(2)~(5)计算得出成都市不同大气环境中 BTEX 的非致癌风险商和致癌风险商如表 4 所示。

由表 4 可知, BTEX 在不同大气环境中对人体的非致癌风险值均表现为苯 > 间/对二甲苯 > 邻二甲苯 > 乙苯 > 甲苯, 范围在 $3.09E-03 \sim 2.98E-01$ 之间, 在 EPA 规定的安全阈值内。城市大气和路边大气的 HI 分别为 $4.47E-01$ 和 $4.29E-01$, 也均在安全范围内。虽然甲苯的浓度最高, 但其对人体的非致癌风险商却在 BTEX 中最低, 在本研究中, 成都市城市大气环境和路边大气环境的非致癌风险商并没有表现出较大的差异, 甚至城市大气环境中的非致癌风险商要略微高于路边大气环境。在不同城市大气环境中, 苯的致癌健康风险商均超过安全阈值, 城市大气环境和路边大气环境中的值分别为 $6.77E-05$ 和 $6.98E-05$, 说明在成都市不同大气环境中的污染物苯都对人体存在致癌风险。长期暴露在高浓度的苯中可能损害骨髓和基因, 能诱发淋巴系统疾病和白血病等一系列病变, 所以应引起重视。

将成都市不同大气环境中 BTEX 的非致癌健康风险商和致癌健康风险商与国内外其他研究(表 4)对比发现, 成都 BTEX 的非致癌风险商与广州、厦

表 4 成都市大气环境中 BTEX 非致癌和致癌风险商值与国内外其它城市的比较¹⁾
Table 4 Comparison between non-cancer and cancer risk of BTEX in Chengdu and other cities

城市	采样区域	HQ					HI	Risk(苯)	文献
		苯	甲苯	乙苯	间/对二甲苯	邻二甲苯			
成都	城区	2.89E-01	2.36E-03	3.34E-03	1.18E-01	3.38E-02	4.47E-01	6.77E-05	本研究
成都	交通区	2.98E-01	3.09E-03	3.19E-03	9.08E-02	3.38E-02	4.29E-01	6.98E-05	本研究
北京	城区	1.57E-01	2.39E-02	3.29E-03	8.06E-03	3.53E-03	1.96E-01	4.19E-05	[5]
广州	混合区	2.28E-01	3.95E-03	4.26E-03	3.06E-02	2.42E-02	2.91E-01	5.34E-05	[22]
厦门	居民区	7.44E-02	1.78E-03	3.61E-03	2.44E-02	1.76E-02	1.22E-01	1.74E-05	[33]
厦门	交通区	1.33E-01	2.73E-03	4.48E-03	2.63E-02	2.63E-02	2.33E-01	3.11E-05	[33]
郑州	城区	2.89E-01	2.37E-02	8.24E-03	6.45E-03	— ¹⁾	3.27E-01	4.05E-05	[38]
釜山(韩国)	城区	2.08E-02	5.16E-03	3.98E-03		1.01E-01	1.31E-01	4.86E-06	[7]
加尔各答	居民区	3.90E-01	2.31E-03	2.88E-03		7.87E-02	4.74E-01	1.82E-05	[15]
(印度)	交通区	7.76E-01	5.40E-03	5.71E-03		1.78E-01	9.65E-01	3.63E-05	[15]

1) 文献中无相关数据

门、韩国釜山和印度加尔各答变化趋势相同,均表现出苯和二甲苯有较高的非致癌风险商。成都苯和二甲苯的非致癌风险商除低于印度加尔各答外,高于其他对比城市,乙苯与其他对比城市水平相当,甲苯的非致癌风险商低于北京和郑州,与其他对比城市相当。各城市的非致癌风险商范围在 2.31E-03~7.76E-01 之间,HI 在 1.22E-01~9.95E-01 之间,均在安全阈值内;总体上,成都不同大气环境均有较高的 HI,高于除印度加尔各答外的其他对比城市。致癌风险方面,各对比城市均超过安全阈值,表明各对比城市均存在致癌风险。值得注意的是,成都的致癌风险商高于全部对比城市,应当引起重视。

3 结论

(1)在成都市,路边大气环境的 VOCs 浓度高于城市大气环境,分别为(132.61±49.31) μg·m⁻³和(108.57±52.43) μg·m⁻³,不同大气环境中均呈现出烷烃>芳香烃>烯烃>炔烃的规律,乙烷、异戊烷、苯、甲苯和间/对二甲苯为成都大气环境中的优势物种。

(2)苯和甲苯的比值(B/T)表明,路边大气环境中的苯系物主要来自交通源的排放,而城市大气环境中的苯系物则来自交通源排放、石油化工和化石燃料的燃烧等。

(3)成都不同大气环境中,芳香烃和烯烃是 OFP 生成的主要烃类,对 TOFP 的贡献超过 80%,其中,影响 OFP 的关键物种为间/对二甲苯、甲苯、乙烯、邻二甲苯和丙烯;路边大气环境中各物种平均最大 O₃ 增量反应活性要高于城市大气环境。

(4)健康风险评价表明,成都市不同大气环境

中各 BTEX 对人体的非致癌风险和总致癌风险均小于 1,对人体的非致癌风险可以忽略;而 BTEX 中致癌物质苯对人体的致癌风险高于安全阈值 1.00E-06,应当引起注意。

参考文献:

[1] Wang B G, Shao M, Lu S H, *et al.* Variation of ambient non-methane hydrocarbons in Beijing city in summer 2008 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10** (13): 5911-5923.

[2] Kansal A. Sources and reactivity of NMHCs and VOCs in the atmosphere: a review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **166**(1): 17-26.

[3] Huang C, Chen C H, Li L, *et al.* Emission inventory of anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(9): 4105-4120.

[4] An J L, Wang Y S, Wu F K, *et al.* Characterizations of volatile organic compounds during high ozone episodes in Beijing, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184** (4): 1879-1889.

[5] Zhang Y J, Mu Y J, Liu J F, *et al.* Levels, sources and health risks of carbonyls and BTEX in the ambient air of Beijing, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24** (1): 124-130.

[6] Smith M T, Zhang L P, Mchale C M, *et al.* Benzene, the exposome and future investigations of leukemia etiology [J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2011, **192**(1-2): 155-159.

[7] Choi E, Choi K, Yi S M. Non-methane hydrocarbons in the atmosphere of a Metropolitan City and a background site in South Korea: Sources and health risk potentials [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(40): 7563-7573.

[8] Bigazzi A Y, Figliozzi M A, Luo W T, *et al.* Breath biomarkers to measure uptake of volatile organic compounds by bicyclists [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50** (10): 5357-5363.

[9] Hatfield M L, Huff Hartz K E. Secondary organic aerosol from biogenic volatile organic compound mixtures [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(13): 2211-2219.

[10] Brauer M, Brook J R. Ozone personal exposures and health

- effects for selected groups residing in the Fraser Valley [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(14): 2113-2121.
- [11] Wei W, Wang S X, Chatani S, *et al.* Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(20): 4976-4988.
- [12] Ryerson T B, Trainer M, Holloway J S, *et al.* Observations of ozone formation in power plant plumes and implications for ozone control strategies[J]. *Science*, 2001, 292(5517): 719-723.
- [13] 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, China[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 424-433.
- [14] 徐慧, 张晗, 邢振雨, 等. 厦门冬春季大气 VOCs 的污染特征及臭氧生成潜势[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 11-17.
- Xu H, Zhang H, Xing Z Y, *et al.* Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 11-17.
- [15] Dutta C, Som D, Chatterjee A, *et al.* Mixing ratios of carbonyls and BTEX in ambient air of Kolkata, India and their associated health risk [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **148**(1-4): 97-107.
- [16] 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.
- [17] Louie P K K, Ho J W K, Tsang Roy C W, *et al.* VOCs and OVOCs distribution and control policy implications in Pearl River Delta region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **76**: 125-135.
- [18] Li L, Li H, Zhang X M, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of benzene homologues in ambient air in the northeastern urban area of Beijing, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(1): 214-223.
- [19] 印红玲, 袁桦蔚, 叶芝祥, 等. 成都市大气中挥发性有机物的时空分布特征及臭氧生成潜势研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(2): 386-393.
- Yin H L, Yuan H W, Ye Z X, *et al.* Temporal and spatial distribution of VOCs and their OFP in the atmosphere of Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(2): 386-393.
- [20] 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.
- Wang Q, Wang H L, Zhou L D, *et al.* Pollution of volatile organic compounds and their contribution to the secondary organic aerosol formation in summer of Chengdu [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2015, **37**(7): 6-12.
- [21] Zhang Y L, Wang X M, Blake D R, *et al.* Aromatic hydrocarbons as ozone precursors before and after outbreak of the 2008 financial crisis in the Pearl River Delta region, south China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, **117**(D15): D15306.
- [22] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [23] 李雷, 李红, 王学中, 等. 广州市中心城区环境空气中挥发性有机物的污染特征与健康风险评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4558-4564.
- Li L, Li H, Wang X Z, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of atmospheric VOCs in the downtown area of Guangzhou, China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4558-4564.
- [24] Liu Y, Shao M, Lu S H, *et al.* Source apportionment of ambient volatile organic compounds in the Pearl River Delta, China: Part II. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6261-6274.
- [25] Barletta B, Meinardi S, Rowland F S, *et al.* Volatile organic compounds in 43 Chinese cities[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(32): 5979-5990.
- [26] Song Y, Shao M, Liu Y, *et al.* Source apportionment of ambient volatile organic compounds in Beijing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(12): 4348-4353.
- [27] Tsai W Y, Chan L Y, Blake D R, *et al.* Vehicular fuel composition and atmospheric emissions in South China: Hong Kong, Macau, Guangzhou, and Zhuhai [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2006, **6**(3): 3687-3707.
- [28] 陆思华, 白郁华, 张广山, 等. 大气中挥发性有机化合物 (VOCs) 的人为来源研究[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(5): 757-763.
- Lu S H, Bai Y H, Zhang G S, *et al.* Source apportionment of anthropogenic emissions of volatile organic compounds[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(5): 757-763.
- [29] Duan J C, Tan J H, Yang L, *et al.* Concentration, sources and ozone formation potential of volatile organic compounds (VOCs) during ozone episode in Beijing [J]. *Atmospheric Research*, 2008, **88**(1): 25-35.
- [30] 王美. 太原市大气中毒害挥发性有机物的暴露特征[D]. 太原: 太原科技大学, 2014.
- [31] Okada Y, Nakagoshi A, Tsurukawa M, *et al.* Environmental risk assessment and concentration trend of atmospheric volatile organic compounds in Hyogo Prefecture, Japan [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, **19**(1): 201-213.
- [32] Hoshi J Y, Amano S, Sasaki Y, *et al.* Investigation and estimation of emission sources of 54 volatile organic compounds in ambient air in Tokyo[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(10): 2383-2393.
- [33] 徐慧, 邓君俊, 邢振雨, 等. 厦门不同功能区 VOCs 的污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(9): 2701-2709.
- Xu H, Deng J J, Xing Z Y, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of VOCs in different functional zones of Xiamen [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(9): 2701-2709.
- [34] Sofuoglu S C, Aslan G, Inal F, *et al.* An assessment of indoor air concentrations and health risks of volatile organic compounds in three primary schools[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2011, **214**(1): 36-46.
- [35] Zhang Y L, Wang X M, Barletta B, *et al.* Source attributions of hazardous aromatic hydrocarbons in urban, suburban and rural areas in the Pearl River Delta (PRD) region [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **250-251**: 403-411.
- [36] Barletta B, Meinardi S, Simpson I J, *et al.* Ambient mixing ratios of nonmethane hydrocarbons (NMHCs) in two major urban

- centers of the Pearl River Delta (PRD) region: Guangzhou and Dongguan [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42 (18): 4393-4408.
- [37] Tang J H, Chan L Y, Chan C Y, *et al.* Characteristics and diurnal variations of NMHCs at urban, suburban, and rural sites in the Pearl River Delta and a remote site in South China[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(38): 8620-8632.
- [38] 南淑清, 张霖琳, 张丹, 等. 郑州市环境空气中 VOCs 的污染特征及健康风险评价[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(9): 1438-1444.
- Nan S Q, Zhang L L, Zhang D, *et al.* Pollution condition and health risk assessment of VOCs in ambient air in Zhengzhou[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(9): 1438-1444.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjks.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.
4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:
期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.
图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.
会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.
学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.
报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.
专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.
11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.
12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjks@rcees.ac.cn;网址:www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (477)
VOCs Emission from Motor Vehicles in China and Its Impact on the Atmospheric Environment	CHEN Tian-zeng, GE Yan-li, LIU Yong-chun, <i>et al.</i> (478)
Quantification of the Influence of Industrial Emissions on Volatile Organic Compounds (VOCs) Using PMF Model; A Case Study of Jiangbei Industrial Zone in Nanjing	 HU Kun, WANG Ming, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (493)
Source Analysis of Volatile Organic Compounds in the Nanjing Industrial Area and Evaluation of Their Contribution to Ozone	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jun-xiu, <i>et al.</i> (502)
Ozone Formation Potential and Priority Species of VOCs in an Industrial Park	WU Lei-dan, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (511)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of a Petrochemical Industrial Park During Autumn in China	HU Tian-peng, LI Gang, MAO Yao, <i>et al.</i> (517)
Characteristics of VOCs Pollution in the Winter Atmosphere of a Typical Petrochemical Industry Park	MAO Yao, LI Gang, HU Tian-peng, <i>et al.</i> (525)
Emission Inventory and Pollution Characteristics of Industrial VOCs in Hangzhou, China	LU Bin, HUANG Cheng, LU Qing, <i>et al.</i> (533)
Industrial VOCs Emission in Qinhuangdao	HU Xiao-yu, LIU Hang, WANG Nai-yu, <i>et al.</i> (543)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Auto/motorcycle Parts & Accessories Manufacturing in Zhejiang Province	 YANG Zhong-ping, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (551)
Stench Sources and Impact Analysis in Automobile Making	SHI Tian-li, ZHANG Wei-xia, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (557)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs Fugitively Emitted from Typical Brewers	GAO Zhan-qi, HU Guan-ju, WANG Hui, <i>et al.</i> (567)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu	LI You-ping, TANG Ya, FAN Zhong-yu, <i>et al.</i> (576)
Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors	 JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, <i>et al.</i> (585)
Emission Inventory of Anthropogenically Sourced VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Jiangsu Province	XIA Si-jia, LIU Qian, ZHAO Qiu-yue (592)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs in Jiangmen City	CHEN Xiao-fang, ZHANG Wei-xia, CHEN Bing-xu, <i>et al.</i> (600)
Emissions, Chemical Composition, and Spatial and Temporal Allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014	LIU Yan, LI Li, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (608)
VOCs Emission Inventory of Service Stations in a Subcenter (Tongzhou District) of the City of Beijing	HUANG Yu-hu, HU Wei, LI Bei-bei, <i>et al.</i> (618)
Pollutant Emissions from Diesel Buses Fueled with Waste Cooking Oil Based Biodiesel	HU Zhi-yuan, LIN Biao-qi, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (626)
Treatment of the Waste Gas Containing Methyl <i>tert</i> -Butyl Ether via a Biotrickling Filter	CHU Qi-ying, YAO Lu-lu, LÜ Xiong-biao, <i>et al.</i> (633)
Composite CVOCs Removal in a Combined System of Nonthermal Plasma and a Biotrickling Filter	GUO Hai-qian, MIAO Jing-jing, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (640)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Semi-volatile Organic Compounds (SVOCs) in Qiantang River's Hangzhou Section During a Water Odor Pollution Event	CHEN Feng, TANG Fang-liang, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (648)
Occurrence and Spatial Distribution of Volatile Organic Compounds in Urban Drinking Water Distribution Systems	XU Mei-jia, WANG Hai-liang, LI Chun-mei, <i>et al.</i> (655)
Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Different Commuting Modes	 TONG Rui-peng, ZHANG Lei (663)
Source Analysis and Environmental Health Risk Assessment of VOCs in Furniture Manufacturing	TONG Rui-peng, ZHANG Lei, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (672)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of PM _{2.5} and Spatio-temporal Variation Characteristics of the Relationship Between PM _{2.5} and PM ₁₀ in Beijing	 YANG Wen-tao, YAO Shi-qi, DENG Min, <i>et al.</i> (684)
Quantification of Methane Ebullition Flux from Small Ponds Using the Inverted-Funnel Method	ZHANG Xiu-fang, XIAO Wei, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (691)
Contamination Levels and Exposure Risk via Drinking Water from Perfluoroalkyl Acids in Seven Major Drainage Basins of China	 WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, WANG Yan-ping, <i>et al.</i> (703)
Spatio-temporal Distribution and Source Apportionment of Nitrogen in Rivers of Tieling	YANG Li-biao, LEI Kun, QIAO Fei, <i>et al.</i> (711)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Rivers of Western Sichuan Plateau Based on EEM-PARAFAC Analysis	 LIU Yan-yang, QIN Ji-hong, LIU Chen, <i>et al.</i> (720)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk of Surface Waters in the City of Ningbo, China	XU Mei-juan, BAO Bo, CHEN Chun-yan, <i>et al.</i> (729)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake	WU Lei, LIU Gui-jian, ZHOU Chun-cai, <i>et al.</i> (738)
Spatial Distribution, Sources and Bioavailability of Heavy Metals in the Surface Sediments of Longjiang River, Southern China	 LAN Xiao-long, NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, <i>et al.</i> (748)
Mechanism on Enhanced Nitrogen Removal in Municipal Secondary Effluent via Internal-Electrolysis Constructed Wetlands at Low Temperature in Winter	 ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, WANG Ju, <i>et al.</i> (758)
Dynamic Replenishment Process of Nutrients in Tributary of Channel Reservoir	XU Ya-qian, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (765)
Effect of the Rainfall on Extinction of Cyanobacteria Bloom and Its Mechanism Analysis	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (774)
Relationship Between Macrophyte Communities and Macroinvertebrate Communities in an Urban Stream	QU Xiao-dong, YU Yang, ZHANG Min, <i>et al.</i> (783)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output in Runoff and Rainfall Runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Lin, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (792)
Screening Method of Priority Control Pollutants in Groundwater Based on Contamination Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (800)
Effect of Sulfur to Quartz Sand Ratios on the Removal of High-Concentration Perchlorate in Packed-Bed Reactors	TAO Hua-qiang, SHAO Dong-hai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (811)
Adsorption of Methylene Blue and Cu(II) by Activated Carbon/Macromolecule Composite Hydrogel	KONG Yan, ZHUANG Yuan, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (819)
Adsorption Performance and Mechanism of HZO@SGH for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution	MA Fu-zhen, ZHOU Shao-qi, LIU Ze-jun, <i>et al.</i> (828)
Mechanism of MgO/CAC Catalyzed Ozonation of Organic Compounds	XU Shan-shan, LIN Cun-wang, DING Ya-lei, <i>et al.</i> (838)
Ozonation Characteristics of Low Coagulability Organic Matter from the Secondary Effluent of WWTPs	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (844)
Quantitative Analysis of Dominant Pollutants in Secondary Effluent via Dye Probe Technology	MENG Xiao-rong, WANG Cong-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (852)
Lab-scale ANAMMOX Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (859)
Effect of Aeration Rate on Shortcut Nitrification Recovery in Intermittent Aeration Mode	LIU Hong, NAN Yan-bin, LI Hui, <i>et al.</i> (865)
Effect of Aerobic/Phosphorus Granules on Start-up of Partial Nitrification Granular Sludge	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (872)
Microbial Communities and Sludge Specific Resistance in Two SBRs Treating Leachate	CAI Li-yun, HUANG Ze-bin, XU Zi-wei, <i>et al.</i> (880)
Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the Urbanization Process of Topsoil	YAO Hong, ZHANG Shi-chao, LIU Ming-li, <i>et al.</i> (889)
Spatial Variability and Contamination of Arsenic in Soils of Xijiang River Basin	LIU Chang, SONG Bo, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (899)
Characterization of Phosphorus in Urban Surface Soils in Kaifeng City and Its Risk of Loss	BAI Xiu-ling, MA Jian-hua, SUN Yan-Li, <i>et al.</i> (909)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Rice System in an E-waste Dismantling Area	YIN Yi-meng, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (916)
Residue Levels and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Rice from Shanghai	MENG Yuan, LIU Cui-cui, QIU Yan-ling, <i>et al.</i> (927)
Effects of Tetracycline Antibiotics on Growth and Characteristics of Enrichment and Transformation in Two Vegetables	CHI Sun-lin, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (935)
Bioavailability of Silicon Fertilizer Coupled Water Management on Soil Bioavailability and Cumulative Control of Rice in Compound Contaminated Paddy Soils	 LI Yuan-xing-lu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, <i>et al.</i> (944)
Liver and Kidney Function of E-waste Dismantling Workers and Potential Influencing Factors	YAN Xiao, LI Shu-yuan, WANG Mei-huan, <i>et al.</i> (953)