

2019年夏季常州市挥发性有机物污染特征分析

王振,李春玉,余益军,杨卫芬

(江苏省常州环境监测中心,江苏 常州 213001)

摘要:2019年8—9月,在常州市洛阳小学、市监测站和武澄工业园3个监测站点开展了为期49 d的环境空气57种挥发性有机物(VOCs)离线加密监测,分析其浓度水平及组成特征。结果表明,3个站点VOCs的体积分数分别为 29.8×10^{-9} , 20.8×10^{-9} 和 25.3×10^{-9} 。3个站点中烷烃的值均值最大,其值占比依次为59.1%,57.2%和51.4%,烷烃中均以乙烷、丙烷和正丁烷值最大。应用臭氧生成潜势(OFP)、OH自由基消耗速率和二次有机气溶胶生成潜势(SOAP)分别对3个站点进行计算,结果显示,各站点芳香烃的数值均最大,OFP占比为67.1%~68.0%,OH自由基消耗速率占比为45.4%~52.0%,SOAP占比为93.3%~94.7%,芳香烃中关键活性组分是甲苯、乙苯和二甲苯等。上风向的洛阳小学与武澄工业园VOCs浓度比市区的市监测站更高,OFP和SOAP也均高于市监测站,表明上风方向的VOCs排放对市区影响较大。

关键词:常州市;挥发性有机物;臭氧生成潜势;二次有机气溶胶生成潜势

中图分类号:X823

文献标志码:B

文章编号:1674-6732(2021)02-0055-05

Analysis on Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds in the Summer of 2019 in Changzhou City

WANG Zhen, LI Chun-yu, YU Yi-jun, YANG Wei-fen

(Jiangsu Changzhou Environmental Monitoring Center, Changzhou, Jiangsu 213001, China)

Abstract: In order to study the concentration and composition characteristics of volatile organic compounds (VOCs) in ambient air in Changzhou City, 57 kinds of VOCs were being measured at 3 sites (Luoyang Primary School, Municipal Monitoring Station and Wucheng Industrial Park) for 49 days by offline densified observation from August 2019 to September 2019. The results showed that the average concentrations of VOCs were 29.8×10^{-9} , 20.8×10^{-9} and 25.3×10^{-9} respectively. The concentrations of alkanes were the highest in all sites, in which ethane, propane and n-butane accounted the most, the percentages of alkanes were 59.1%, 57.2% and 51.4% respectively. OFP (ozone formation potential), OH consumption rate and SOAP (secondary organic aerosol formation potential) were applied to assess reactivity of VOCs. The calculation results showed that aromatics contributed the largest parts of the OFP, OH consumption rate and SOAP at each site, the corresponding percentages were 67.1%~68.0%, 45.4%~52.0% and 93.3%~94.7% among 3 sites respectively. Toluene, ethylbenzene and xylene were the key active components in aromatics. The concentrations of VOCs on upwind sites, Luoyang Primary School and Wucheng Industrial Park, were higher than that on urban site, Municipal Monitoring Station, the OFP and SOAP showed the same as well, indicating that the VOCs emissions from the upwind had a great impact on the urban area.

Key words: Changzhou city; VOCs; OFP; SOAP

挥发性有机物(VOCs)是大气光化学过程中重要的参与物质,紫外线与氮氧化物(NO_x)通过光化学反应会生成臭氧(O_3)等污染物。此外,VOCs可与大气中OH等自由基通过氧化反应生成过氧乙酰硝酸酯等二次有机气溶胶(SOA),对颗粒物污染

具有重要贡献^[1-2]。VOCs作为 O_3 和SOA的重要前体物,是影响空气质量的关键因素之一^[3-5]。在长三角等经济发达区域,VOCs的浓度更是呈逐年上升态势^[6-8]。

近年来,常州市 O_3 污染日益严重,超过《环境

收稿日期:2020-08-04;修订日期:2020-09-21

基金项目:常州市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧复合污染形成机制研究基金资助项目(CJ20180039)

作者简介:王振(1987—),男,工程师,硕士,主要从事大气环境监测工作。

空气质量标准》(GB 3095—2012)中规定的二级标准限值($160 \mu\text{g}/\text{m}^3$)的天数逐年增加,并于 2019 年首次超过 $\text{PM}_{2.5}$ 污染天数,成为常州市的主要大气污染物。由于 VOCs 化学组成复杂、活性差异巨大,只有对其关键组分进行监测和识别才能制定相应的控制措施,实现精细化管控。目前,常州地区典型大气污染条件下 VOCs 的污染特征、 O_3 生成潜势(OFP)和 SOA 生成影响的相关研究相对缺乏。现对常州市区 3 个站点开展为期 49 d 的大气 VOCs 离线监测,计算不同 VOCs 种类对 O_3 和 SOA 生成的贡献,以甄选出常州市区 VOCs 的优先控制物种,为常州市区大气污染防治提供参考。

1 研究方法

1.1 监测时间及点位

2019 年 8 月 13 日—9 月 30 日,在常州市洛阳小学、市监测站和武澄工业园 3 个点位,每日 07:00—08:00 以瞬时采样的方式采集样品。市监测站位于常州市区,为国控站点,代表城市区域;洛阳小学位于常州市东南区域,为江苏省质控站点,测点周边有溶剂使用来源;武澄工业园位于常州市东北偏东方位,园区内纺织等企业较多。气象资料数据来源于常州市气象局气象综合观测场,图 1 为站点位置及风玫瑰图。加密监测期间风向以东偏南、东风和东北风为主,平均风速约为 2.0 m/s ,最高风速为 9.0 m/s 。由图 1 可见,监测期间洛阳小学和武澄工业园站点均位于常州市区的上风方向。

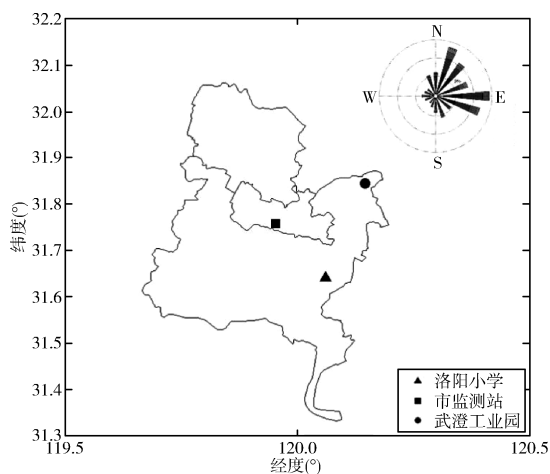


图 1 站点位置与观测期间风玫瑰图

1.2 样品采集及分析

本研究对环境空气样品的分析方法主要参照美国环保局(EPA)光化学评估监测站的方法要求^[9],分析目标为该方法规定的 57 种大气光化学活性 VOCs。VOCs 样品由内表面为硅烷涂层的 3.2 L 苏玛罐进行真空负压采集。采样前对苏玛罐充高纯氮气,保持 5 min 后抽真空至 6.7 Pa ,反复对苏玛罐清洗 3 次,最后一次抽真空至 1.6 Pa 。每次采样选取 1 只苏玛罐充入高纯氮气作为样品进行分析,以保证目标组分未检出或低于方法检出限。采样结束后,将苏玛罐阀门关闭拧紧后,密闭遮光并立即送往实验室分析,并于次日上午给出昨日监测数据。

环境空气样品分析仪器为 Entech 7016D 型预浓缩仪、7200 型气体冷阱浓缩仪(博赛德科技有限公司)和 7890B + 5977B 型气相色谱-质谱联用仪(美国 Agilent 公司)。采样泵抽取苏玛罐中的环境空气样品至超低温预浓缩系统,气体被冷冻富集在捕集柱上,随后进行热解吸,热解吸后目标化合物在载气的吹扫下分别进入两路的分析柱和检测器,然后将数据记录在数据采集系统中。

1.3 VOCs 相关评价的计算

采用 VOCs 在 O_3 最大增量反应中的 O_3 生成系数(MIR)、OH 自由基反应速率常数(K^{OH})和气溶胶生成系数(FAC)估算大气 VOCs 的 OFP、OH 消耗速率与二次有机气溶胶生成潜势(SOAP)^[10-14]。该方法既考虑了 VOCs 生成 O_3 与二次有机气溶胶的能力,又考虑了 VOCs 的动力反应性,因此在国内外大气环境化学研究中得到广泛应用^[15]。

OFP 用来表征 VOCs 各个物种转化为 O_3 的能力,即 VOCs 各组分在最佳条件下对地面 O_3 生成的最大潜势。计算公式如下:

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

式中: OFP_i —— VOCs_i 的 OFP, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; MIR_i —— VOCs_i 的 MIR; $\rho(\text{VOCs}_i)$ —— VOCs_i 的质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

环境空气中的 VOCs 主要通过 OH 自由基的反应去除,生成的过氧烷基是大气中 O_3 形成的关键步骤。因此,OH 自由基的消耗速率可以反映 VOCs 中各种物质对光化学反应的相对贡献。计算公式如下:

$$L_i^{\text{OH}} = c(\text{VOCs}_i) \times K_i^{\text{OH}} \quad (2)$$

式中: L_i^{OH} —— VOCs_i 的 OH 自由基消耗速率, s^{-1} ; $c(\text{VOCs}_i)$ —— VOCs_i 的摩尔浓度, mol/m^3 ;

K_i^{OH} ——VOCs_i与OH自由基的反应速率常数, $\text{m}^3/(\text{mol} \cdot \text{s})$ 。

为评估不同种类VOCs对SOA生成的贡献,计算了各VOCs物种的SOAP。计算公式如下:

$$\text{SOAP}_i = \text{FAC}_i \times \rho(\text{VOCs}_i)/(1 - \text{FVOCs}_i) \quad (3)$$

式中: SOAP_i ——VOCs_i的SOAP, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; FAC_i ——VOCs_i的FAC; $\rho(\text{VOCs}_i)$ ——VOCs_i的质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; FVOCs_i ——VOCs_i中参与反应的比例, %。FAC_i和FVOCs_i来源于Grosjean等^[13-14]的烟雾箱实验模型。

2 结果与讨论

2.1 VOCs的浓度水平与污染特征

本研究实际检出47种O₃前体混合物(PAMS)

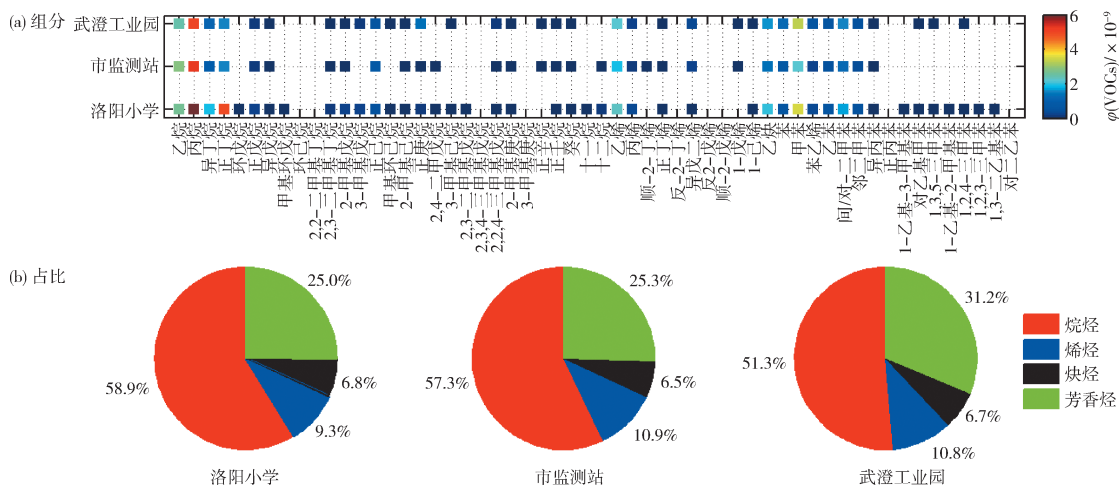


图2 加密监测期间VOCs浓度水平以及各组分占比

由表1可见,3个站点中VOCs体积分数均值以洛阳小学最高,其次是武澄工业园,市监测站最低。洛阳小学除芳香烃外,烷烃、烯烃和炔烃在3个站点中体积分数均为最高;武澄工业园芳香烃体积分数最高;市监测站的烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃均最低。加密监测期间盛行东北风与东南风,表明VOCs体积分数较高的洛阳小学和武澄工业园对下风向市区中的VOCs体积分数水平具有一定影响,进而影响市区O₃污染水平。常州市区环境空气中VOCs体积分数水平与国内其他典型城市相比,可以发现,常州3个站点VOCs体积分数总体均值处于中等水平,低于南京、北京和广州,高于上海,与成都、贵阳大体相当。

由图2可见,各站点组分占比均以烷烃占比最高(51.3%~58.9%),芳香烃次之(25.0%~31.2%),烯

组分,其中烷烃25种、烯烃7种、炔烃1种、芳香烃14种。3个站点以及国内城市VOCs组分体积分数及占比见表1与图2(a)(b)。

表1 常州3个站点以及国内城市VOCs组分体积分数

站点及地区	体积分数/ 10^{-9}				
	烷烃	烯烃	炔烃	芳香烃	VOCs
洛阳小学	17.6	2.8	2.0	7.5	29.8
市监测站	11.9	2.3	1.4	5.3	20.8
武澄工业园	13.0	2.7	1.7	7.9	25.3
贵阳(2018年) ^[5]	13.6	2.5	2.0	3.8	21.9
广州(2016年) ^[16]	22.2	4.9	1.6	6.2	34.9
成都(2017年) ^[16]	13.2	3.5	3.0	3.0	22.7
南京(2013年) ^[1]	18.8	6.9	4.7	10.5	40.9
北京(2017年) ^[4]	19.0	6.6	3.5	5.3	34.4
上海(2012年) ^[18]	8.2	2.2	0.9	7.5	18.8

烃第三(9.3%~10.9%),炔烃最低(6.5%~6.8%)。烷烃中高体积分数组分以低碳数的VOCs为主,其中乙烷、丙烷和正丁烷等占比较高,其主要来源于液化石油气/天然气的泄漏以及机动车尾气的排放。芳香烃主要以苯和甲苯为主,3个站点中甲苯的体积分数水平均较高;甲苯和苯等低碳芳香烃可能与有机溶剂的挥发过程有关,若甲苯/苯(V/V)>2,站点周边可能受溶剂涂料和工业过程的影响^[19-20]。烯烃中以低碳烯烃为主,乙烯和丙烯等体积分数较高;低碳烯烃的来源比较广泛,主要与燃烧过程、工业溶剂和原料使用有关。乙炔也主要来源于化石燃料燃烧过程^[21-22]。结果表明,站点周边烷烃、芳香烃占比较高,乙烷、丙烷、正丁烷、苯和甲苯为主要影响组分^[21-23];站点周边均存在液化石油气/天然气的泄漏、机动车尾气排

放以及有机溶剂的使用等活动。

2.2 VOCs 的 OFP

洛阳小学、市监测站和武澄工业园的 OFP 平均值分别为 233.8, 162.8 和 218.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, OFP 贡献最大的前 10 种 VOCs 见图 3(a)(b)(c)。

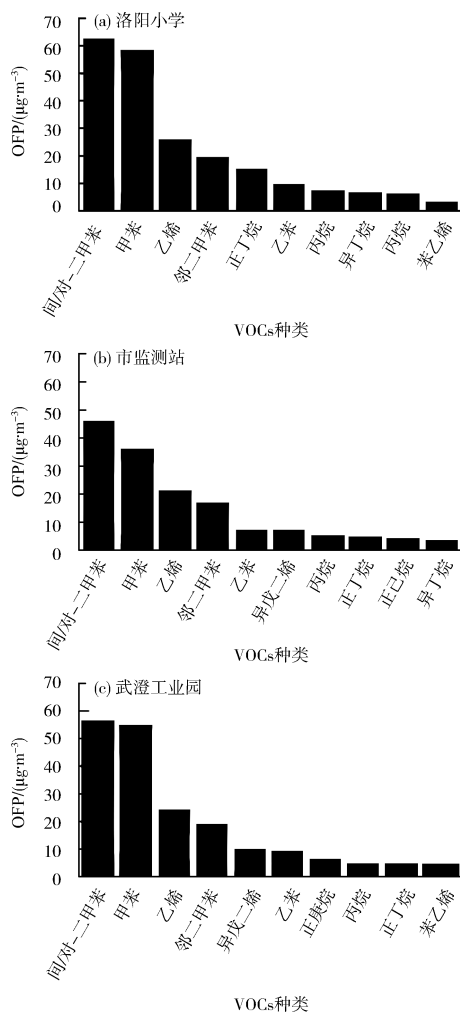


图 3 OFP 贡献最大的前 10 种 VOCs

3 个站点中 OFP 主要贡献均来源于芳香烃, 其贡献均值分别为 157.2, 109.2 和 148.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 贡献占比分别为 67.2%, 67.1% 和 68.0%; 烷烃类的贡献分别为 16.1%, 12.1%, 12.7%; 烯烃类的贡献分别为 15.7%, 19.9%, 18.5%; 炔烃类的贡献最低, 分别为 0.96%, 0.92% 和 0.85%。3 个站点的芳香烃中, 间/对-二甲苯、甲苯、邻二甲苯和乙苯均有较高贡献; 烯烃中仅乙烯贡献较高。3 个站点中尽管烷烃类化合物的质量浓度水平均最高, 但烷烃对 O_3 的贡献也相对较小, 这是由于烷烃的大气光化学反应活性相比芳香烃和烯烃较低; 芳香烃

对周边环境空气的 O_3 影响较大, 其次是烯烃。OFP 为 VOCs 各组分在最佳条件下对近地面 O_3 生成的最大贡献, 因此对于常州控制芳香烃和烯烃类物种的排放以改善夏季 O_3 污染至关重要。

2.3 VOCs 的 OH 自由基消耗速率

O_3 形成的决定因素为 VOCs 与 OH 自由基的反应速率。VOCs 与 OH 自由基的消耗速率反映出单个 VOCs 分子对光化学反应的相对贡献。3 个站点芳香烃对 OH 自由基消耗的占比最大, 其次是烯烃, 烷烃第三, 炔烃最小, 表明各监测区域芳香烃、烯烃活性较大, 对光化学反应的贡献相对较大, 这也与文献[1-3, 15]研究相一致。3 个站点中 OH 消耗速率占比最大的前 10 种组分见图 4(a)(b)(c)。由图 4 可见, 贡献最大的前 10 种组分共占 OH 消耗速率均为 80% 以上, 其中, 间/对-二甲苯

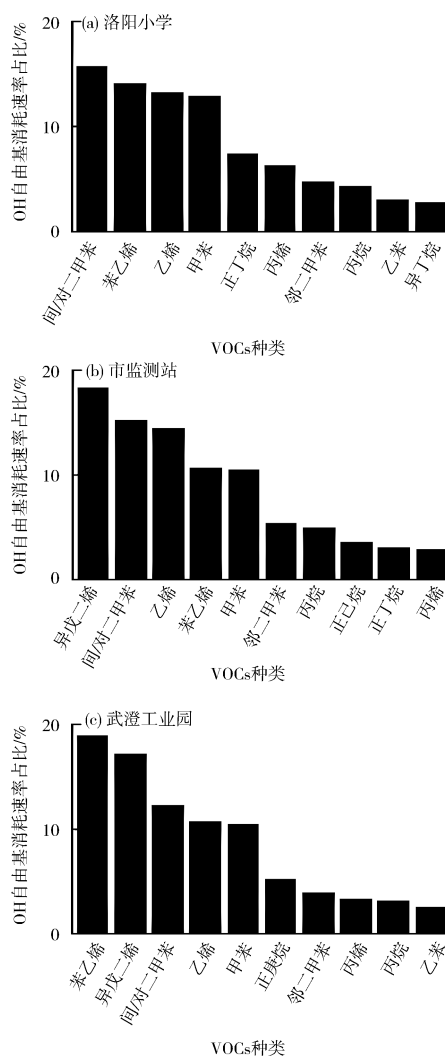


图 4 OH 自由基消耗速率最大的前 10 种 VOCs

的 OH 消耗速率占比均较大,表明其活性最大;乙烯和苯乙烯对 OH 消耗速率占比相对较高。

2.4 VOCs 的 SOAP

有研究发现,苯与异戊二烯等碳数较少的短链 VOCs 经氧化产生的含羰基产物可以通过异相反应生成 SOA^[24-25],因此本研究充分考虑了苯和异戊二烯的 FAC。烷烃对 SOA 生成具有贡献的物种共有 18 种,烯烃 1 种,芳香烃 14 种。3 个站点的 SOAP 的平均值分别为 1.9, 1.5 和 1.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; SOAP 主要贡献均来源于芳香烃,其贡献均值分别为 1.8, 1.4 和 1.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 贡献占比分别为 94.7%, 93.3% 和 94.4%。VOCs 中质量浓度占比较高的烷烃类 SOAP 的贡献分别为 3.5%, 3.3% 和 3.1%。此外,3 个站点中烯烃的 SOAP 贡献分别为 1.1%, 2.1% 和 1.7%。甲苯、间/对-二甲苯、邻二甲苯、苯乙烯和苯等组分的 SOAP 贡献均较高。SOAP 贡献最大的

前 10 种 VOCs 见图 5(a)(b)(c),由图 5 可见,贡献较大的前 10 种组分中芳香烃种类较多,各个站点的芳香烃对周边环境空气中气溶胶浓度影响较大。

3 结论

(1) 处于常州市区上风方向的洛阳小学和武澄工业园 VOCs 体积分数分别为 29.8×10^{-9} 和 25.3×10^{-9} , 均比市监测站的体积分数 (20.8×10^{-9}) 高,表明常州市区上风方向 VOCs 影响较大;市监测站的烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃浓度均小于上风方向的 2 个站点。

(2) 对 VOCs 进行 OFP 分析,3 个站点中洛阳小学最高,市监测站最低。各站点中芳香烃贡献均 > 60%,其中以间/对二甲苯和甲苯贡献较大;烯烃中贡献较高的是乙烯;烷烃中丙烷、正丁烷贡献较高。

(3) 利用 OH 自由基的消耗速率公式计算 VOCs 对 OH 的消耗速率,常州城区各站点芳香烃对 OH 的贡献均最大,其中甲苯、二甲苯和苯乙烯为贡献占比较高的物种;烯烃中的乙烯和苯乙烯为贡献较大的物种。

(4) 常州城区上风方向的洛阳小学和武澄工业园的 SOAP 均高于市区的市监测站,3 个站点中芳香烃的 SOAP 贡献占比均最大,其中甲苯、二甲苯和苯乙烯等组分为 SOAP 的主要贡献物种。

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] 王扶潘,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.
- [3] 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.
- [4] 李斌,张鑫,李娜,等.北京市春夏挥发性有机物的污染特征及源解析[J].环境化学,2018,37(11):2410-2418.
- [5] 黄海梅,郭佳,王章玮,等.贵阳市大气挥发性有机物的初步分析[J].环境化学,2018,37(11):2387-2396.
- [6] ZHANG Y J, TANG L L, WANG Z, et al. Insights into characteristics sources and evolution of submicron aerosols during harvest seasons in the Yangtze River delta region, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(3):1331-1349.
- [7] WANG T, XUE L K, BRIMBLECOMBE P, et al. Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575:1582-1596.

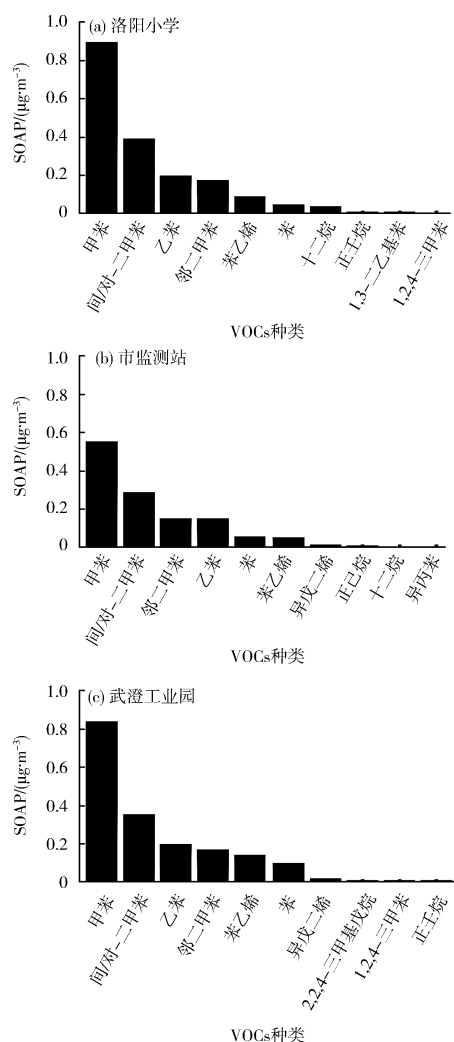


图 5 SOAP 贡献最大的前 10 种 VOCs

(下转第 65 页)

- Technology International Corp, 1997.
- [25] 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [26] 谷庆宝, 郭观林, 周友亚, 等. 污染场地修复技术的分类、应用与筛选方法探讨[J]. 环境科学研究, 2008, 21(2): 197-202.
- [27] 夏威夷. 新型羟基磷灰石基固化剂修复铅锌镉复合污染土的机理与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [28] 周建利. 铅锌矿废水污染土壤联合修复技术及对地下水的的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2009.
- [29] 谷庆宝, 颜增光, 周友亚, 等. 美国超级基金制度及其污染场地环境管理[J]. 环境科学研究, 2007, 20(5): 84-88.
- [30] 温丹丹, 解洲胜, 鹿腾. 国外工业污染场地土壤修复治理与再利用——以德国鲁尔区为例[J]. 中国国土资源经济, 2018(5): 52-58.
- [31] 刘春霞. 土壤重金属污染的国际治理经验及对我国的启示[J]. 许昌学院学报, 2018, 37(3): 86-89.
- [32] 徐建, 林玉锁, 金鑫, 等. 应用斑马鱼和凡纳对虾诊断污染场地污水的生物毒性[J]. 环境监测管理与技术, 2008, 20(5): 52-55.
- [33] 吴以中, 朱沁园, 刘宁, 等. 污染场地地下水渗流场模拟与评价——以柘城县为例[J]. 生态学报, 2012(4): 1283-1292.
- [34] 冯亚松, 夏威夷, 杜延军, 等. SPB 和 SPC 固化稳定化镍锌污染土的强度及环境特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 3062-3074.
- [35] 王加华, 张峰, 马烈. 重金属污染土壤稳定化修复药剂研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2016, 34(2): 49-52.
- [36] 鄂佳楠, 周睿, 郑龙日, 等. 基于蒙特卡罗法和层次分析法的污染场地地下水修复技术筛选方法研究[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(5): 499-503, 509.
- [37] 张伯强, 安达, 王月, 等. 基于 MCDA 的沙漠地区污染场地地下水修复技术优化方法[J]. 环境工程学报, 2016, 10(10): 5521-5527.
- [38] 魏明刚, 伍浩良, 杜延军, 等. 冻融循环下含磷材料固化铅镉污染土的强度及溶出特性研究[J]. 岩土力学, 2015(S1): 215-219.
- [39] 曹智国, 章定文, 刘松玉. 固化铅污染土的干湿循环耐久性试验研究[J]. 岩土力学, 2013(12): 3485-3490.
- [40] 刘国强, 高辉, 徐虎林, 等. 污染土壤修复与房地产开发结合施工探索: 以南京市某搬迁化工企业原址用地为例[J]. 环境工程, 2017, 35(S1): 469-472.

(上接第59页)

- [8] WANG M Y, CAO C X, LI G S, et al. Analysis of a severe prolonged regional haze episode in the Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2015, 102: 112-121.
- [9] The Clean Air Scientific Advisory Committee. Review of EPA's Photochemical Assessment Monitoring Stations (PAMS) Network Re-engineering Project [M]. NC: USEPA, 2011.
- [10] CARTER W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. Air and Waste, 1994, 44(7): 881-899.
- [11] 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.
- [12] ATKINSON R, AREY J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds [J]. Chemical Review, 2003, 103(12): 4605-4638.
- [13] GROSJEAN D, SEINFELD J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols [J]. Atmospheric Environment, 1989, 23(8): 1733-1747.
- [14] GROSJEAN D. In situ organic aerosol formation during a smog episode estimated production and chemical functionality [J]. Atmospheric Environment, 1992, 26A: 953-963.
- [15] 唐孝炎, 张远航, 邵敏, 等. 大气环境化学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [16] 虞小芳, 程鹏, 古颖纲, 等. 广州市夏季 VOCs 对臭氧及 SOA 生成潜力的研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 830-837.
- [17] 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 等. 成都市 2017 年夏季大气 VOCs 污染特征、臭氧生成潜势及来源分析[J]. 环境科学研究, 2019, 32(4): 619-626.
- [18] 罗达通, 高健, 王淑兰, 等. 上海秋季大气挥发性有机物特征及污染物来源分析[J]. 中国环境科学, 2015, 35(4): 987-994.
- [19] NELSON P E, QUIGLEY S M. The hydrocarbons compositions of exhaust emitted from Gasoline fueled vehicles [J]. Atmospheric Environment, 1984, 18(1): 79-87.
- [20] 吴方堃, 孙杰, 余晔, 等. 长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3308-3314.
- [21] KIM E, HOPKE P K, EDGERTON E S. Source identification of Atlanta aerosol by positive matrix factorization [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2003, 53(6): 731-739.
- [22] HATFIELD M L, HARTZ K E H. Secondary organic aerosol from biogenic volatile organic compound mixtures [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(13): 2211-2219.
- [23] LI J, XIE S D, ZENG L M, et al. Characterization of ambient volatile organic compounds and their sources in Beijing, before, during, and after Asia-Pacific Economic Cooperation China 2014 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(14): 7945-7959.
- [24] JACOBSON M C, HANSSON H C, NOONE K J, et al. Organic atmospheric aerosols: Review and state of the science [J]. Reviews of Geophysics, 2000, 38(2): 267-294.
- [25] JANG M, CZOSCHKE N M, LEE S, et al. Heterogeneous atmospheric aerosol production by acid-catalyzed particle-phase reactions [J]. Science, 2002, 298: 814-817.

栏目编辑 王 湜 李文峻 周立平 谭 艳