

## 深圳城市大气中非甲烷烃季节变化特征

朱波<sup>1</sup>,王川<sup>1</sup>,于广河<sup>2</sup>,曾立民<sup>3</sup>,黄晓锋<sup>1\*</sup>,何凌燕<sup>1</sup> (1.北京大学深圳研究生院,环境与能源学院,城市人居环境科学与技术重点实验室,广东深圳 518055; 2.北京大学深圳研究院,环境实验室,广东深圳 518057; 3.北京大学环境科学与工程学院,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100871)

**摘要:** 应用 GCMS-QP2010 对深圳 2015~2016 年 4 个季节大气 56 种非甲烷碳氢化合物(NMHCs)进行在线监测分析.从成分来看,四季总 NMHCs 平均浓度为  $23.6 \times 10^{-9}$ , 呈现出冬季>秋季>夏季~春季的变化特征,其中烷烃比例最高(65.4%~74.7%),其次是芳香烃(13.3%~21.7%)和烯烃(7.1%~11.6%),丙烷、甲苯、乙烷、正己烷、正丁烷、乙炔、2-甲基戊烷、异丁烷、乙烯和 3-甲基戊烷是浓度最高的 10 个物种.相关性和日变化分析表明,深圳大气中 NMHCs 受到机动车、溶剂挥发相关工业源以及植物释放等多重来源的共同影响,其中甲苯、2-甲基戊烷、3-甲基戊烷和正己烷受工业源影响最为显著,而异戊二烯主要来自于天然源.

**关键词:** 挥发性有机物; 非甲烷烃; 深圳; 机动车排放; 工业源

**中图分类号:** X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2018)02-0418-08

**Characterization of seasonal variation of non-methane hydrocarbons in the urban atmosphere in Shenzhen.** ZHU Bo<sup>1</sup>, WANG Chuan<sup>1</sup>, YU Guang-he<sup>2</sup>, ZENG Li-min<sup>3</sup>, HUANG Xiao-feng<sup>1\*</sup>, HE Ling-yan<sup>1</sup> (1.Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Environment and Energy, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China; 2.Environmental Laboratory, Shenzhen Research Institute of Peking University, Shenzhen 518057, China; 3.State Joint Key Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China). *China Environmental Science*, 2018,38(2): 418~425

**Abstract:** Online GCMS-QP2010 was utilized to monitor 56 kinds of atmospheric non-methane hydrocarbons (NMHCs) during the four seasons from 2015 to 2016 in Shenzhen. The annual mean concentration of total NMHCs was  $23.6 \times 10^{-9}$ , while the highest total concentration of NMHCs was found in winter, followed by autumn, and the minimal concentration occurred in summer and spring. Alkanes were the most abundant components (65.4%~74.7%) in atmospheric NMHCs in Shenzhen, followed by aromatics (13.3%~21.7%) and alkenes (7.1%~11.6%). We also found that the concentrations of propane, toluene, ethane, hexane, butane, acetylene, 2-methyl pentane, isobutane, ethene and 3-methyl pentane ranked the top ten species in the measured NMHCs. The results of correlation and diurnal variation analysis indicated that atmospheric NMHCs in Shenzhen were simultaneously influenced by vehicle emission, industrial sources (e.g., solvent evaporation) and plant emission. Toluene, 2-methyl pentane, 3-methyl pentane and hexane were predominantly affected by industrial sources, while isoprene was mainly from natural sources.

**Key words:** VOCs; NMHCs; Shenzhen; vehicle emission; industrial sources

随着近几年对大气污染控制措施的实行,  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的浓度水平已经明显下降,但是在珠江三角洲区域地表  $\text{O}_3$  浓度长期以来一直没有得到明显改善<sup>[1-3]</sup>. $\text{O}_3$  主要是大气中的 VOCs 和  $\text{NO}_x$  光化学反应生成的二次污染物,会使人眼和呼吸道受刺激或诱发各种呼吸道炎症,危害人体健康<sup>[4]</sup>.根据 2016 年度深圳市环境状况公报,深圳作为全国 4 个一线城市之一,其大气

$\text{PM}_{2.5}$  浓度水平已经符合国家二级标准, $\text{O}_3$  成为空气中首要污染物<sup>[5]</sup>,因此接下来对于  $\text{O}_3$  浓度水平和 VOCs 的控制将是需要面对的挑战.

收稿日期: 2017-07-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1301234);国家科技支撑项目(2014BAC21B03);深圳市科技计划项目(JCYJ20170412150626172/JCYJ20150828092818268)

\* 责任作者,教授, huangxf@pku.edu.cn

NMHCs 在大气 TVOCs 中的浓度相对较高,同时其中的许多物质具有较高的光化学反应活性,是光化学反应的重要前体物,对城市大气光化学烟雾的形成有着至关重要的作用<sup>[6]</sup>.当前对大气 VOCs 的研究主要集中在区域背景点的浓度水平<sup>[7]</sup>和城市点的 VOCs 成分组成、时空变化和来源解析等方面的研究<sup>[8]</sup>.国内外大部分学者只针对大型活动项目<sup>[9-11]</sup>、部分季节大气成分变化<sup>[12-15]</sup>或者通过离线罐采样方式<sup>[16-17]</sup>等进行研究,对城市大气中 VOCs 的四季长期在线连续观测的研究相对较少<sup>[18-19]</sup>.为了解深圳市大气 NMHCs 的污染特征和浓度水平,本研究对深圳 2015~2016 年 4 个季节大气 VOCs 的 56 种

NMHCs 进行监测与分析,为城市大气 VOCs 综合治理提供科学支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样时间、地点和气象特征

深圳位于中国南部海滨,毗邻香港,东临大亚湾和大鹏湾,西濒珠江口和伶仃洋,南边深圳河与香港相连,北部与东莞、惠州接壤.深圳市所处纬度较低,属亚热带季风气候,其季节划分与传统的季节划分不同.按照深圳市气象局的划分方法,春夏秋冬 4 个季节的划分日期分别为 2 月 6 日~4 月 20 日、4 月 21 日~11 月 2 日、11 月 3 日~翌年 1 月 12 日、1 月 13 日~2 月 5 日<sup>[20]</sup>.

表 1 四季采样时间段和气象特征

Table 1 The time of sampling and meteorological parameters in all the seasons

采样时间段	代表季节	相对湿度(%)	温度(°C)	主导风向	风速(m/s)
2015.10.15 ~ 2015.11.15	秋季	68	25	西北、东北风	0.76
2015.12.16 ~ 2016.01.20	冬季	71	17	东北风	0.87
2016.04.01 ~ 2016.04.15	春季	79	24	东北、西南风	0.85
2016.06.29 ~ 2016.07.27	夏季	75	30	西南风	0.88

本研究中连续测定大气中 NMHCs 浓度的 4 个季节采样时段及气象条件如表 1 所示,气象数据由大学城北大校区的气象站采集,包括相对湿度、温度、风向和风速.监测点设在深圳大学城北大校区 E 栋楼顶(22°35'28"N,113°58'30"E),距离地面约 25m.大学城周围道路的交通量适中,南面靠近留仙大道,东南面为南坪快速,北面紧邻动物园和麒麟山庄,周围植被茂盛;附近以居民住宅为主,兼有零星的商业区和工业区.

### 1.2 样品采集和分析方法

应用 TH-300B 大气环境挥发性有机物在线监测系统观测大气中 VOCs 浓度水平,仪器的预浓缩系统由武汉市天虹仪表有限责任公司制造,GCMS-QP2010 分析系统由日本岛津公司生产.样品采集为整点进样,在进样同时加入 4 个内标,进样时间为 5min,各路流量为 60mL/min.大气中的 VOCs 在泵的动力下从采样头进入到采集系统,经去除水和 CO<sub>2</sub> 后进入到捕集阱中,在超低温制冷技术下捕集管的制冷温度为-160℃,可

以实现目标化合物的完全捕集.然后快速加热至 120℃,保证干扰物去除,目标化合物同载气 He 一同进入检测器进行分析.在进样解析过程中,一路通过 PLOT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 色谱柱进入到 GC-FID 检测器检出,主要分析 C<sub>2</sub>~C<sub>5</sub> 的低碳 VOCs;另一路用于分析 C<sub>5</sub>~C<sub>12</sub> 的高碳 VOCs,通过 DB-624 色谱柱进入到 MS 检测器被检出.在解析分析结束后,仪器通过加热反吹系统用 He 清洗管路内部残留,等待下一次进样过程.

### 1.3 数据处理方法

本方法采用内标和外标来对仪器进行标定和校准,所使用的气体为: 56 种光化学前体物混合标准气体(PAMS); 4 种内标化合物混合标准气体.

MS 定量分析根据标准化合物在 29~200u 的全扫描质谱图信息,选择合适的定量离子与参考离子,并根据保留时间编制选择离子(SIM)表.分析过程中采用内标法,在 5~7 个浓度梯度的标准样品与未知样品中均加入已知含量的内标,然后作出响应

信号与相对含量之间的校准曲线,进而根据目标化合物的响应信号得到未知样品中对应的浓度。

FID 定量分析采用外标法,用已知 5~7 个不同浓度梯度的标准样品进样分析,根据响应信号与浓度之间的关系得到校准曲线,进而得到各目标化合物的浓度。

## 2 结果与分析

### 2.1 深圳市大气 VOCs 的浓度及组成

本次监测的 56 种 NMHCs 包括 29 种烷烃、10 种烯烃、1 种炔烃和 16 种芳香烃。图 1 为观测期间深圳大气烷烃、烯烃、芳香烃各季节浓度水平。在观测期间,全年 56 种 NMHCs(以下简称为总 NMHCs)的总浓度变化范围较大,年平均浓度为  $23.6 \times 10^{-9}$ ,秋、冬、春、夏 4 个季节的总 NMHCs 平均浓度分别为  $25.2, 35.1, 16.6$  和  $17.5 \times 10^{-9}$ ,呈现出冬季>秋季>夏季 $\approx$ 春季的季节特征。如表 1,冬季较低气温带来的低大气边界层和弱光化学消

耗是 NMHCs 浓度累积的重要原因,而来自西南的洁净海洋气团稀释是夏、春季 NMHCs 浓度较低的重要原因。在各季节中烷烃在总 NMHCs 中贡献最大,其次为芳香烃和烯烃,所占比例分别为 65.4%~74.7%、13.3%~21.7%和 7.1%~11.6%。

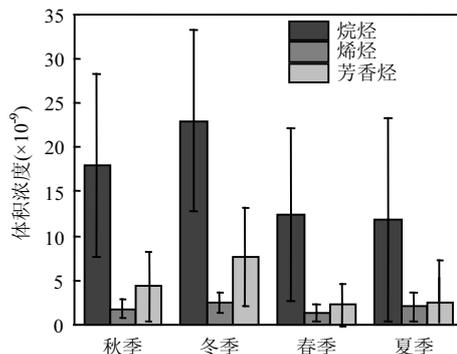


图 1 大气烷烃、烯烃、芳香烃浓度的季节变化  
Fig.1 Seasonal variations of the concentrations of alkanes, alkenes and aromatic hydrocarbons

表 2 深圳各季及国内部分城市 VOCs 浓度最高的前 10 个物种对比表( $\times 10^{-9}$ )  
Table 2 Comparison of top ten VOCs in Shenzhen and in other cities in China ( $\times 10^{-9}$ )

排序	秋季	冬季	春季	夏季	深圳全年 (2015.10~ 2016.7)	深圳 <sup>[27]</sup> (2010.1~ 2010.11)	南京 <sup>[28]</sup> (2011.3~2012.2)	济南 <sup>[29]</sup> (2010.6~2012.5)
1	丙烷 3.19	丙烷 5.27	丙烷 2.65	丙烷 2.32	丙烷 3.55	甲苯 10.43	乙烷 6.97	环戊烷 2.49
2	乙烷 3.18	甲苯 4.13	乙烯 1.40	正己烷 1.62	甲苯 2.53	2-甲基 戊烷 6.84	乙烯 5.68	乙烷 2.01
3	甲苯 2.47	乙烷 3.07	正己烷 1.30	甲苯 1.43	乙烷 2.13	正己烷 4.55	丙烷 3.29	丙烷 1.89
4	正己烷 2.06	正丁烷 2.60	正丁烷 1.22	正丁烷 1.25	正己烷 1.86	丙烷 4.38	苯 3.14	丙烯 1.88
5	正丁烷 1.86	正己烷 2.25	2-甲基 戊烷 1.13	乙炔 1.20	正丁烷 1.82	正丁烷 4.08	乙炔 3.12	乙烯 1.73
6	2-甲基 戊烷 1.45	乙炔 2.06	甲苯 0.99	2-甲基 戊烷 1.15	2-甲基 戊烷 1.38	间/对- 二甲苯 3.41	丙烯 2.45	异丁烷 1.72
7	异丁烷 1.16	乙烯 1.79	3-甲基 戊烷 0.98	3-甲基 戊烷 0.92	乙炔 1.31	异丁烷 2.84	甲苯 2.10	顺-2- 丁烯 1.62
8	乙炔 1.12	异丁烷 1.71	异丁烷 0.80	乙烯 0.80	异丁烷 1.17	乙苯 2.76	正丁烷 1.69	异戊烷 1.10
9	3-甲基 戊烷 1.05	2-甲基 戊烷 1.65	乙烯 0.76	正丁烷 0.78	3-甲基 戊烷 1.14	苯 2.23	1-丁烯 1.61	正丁烷 1.04
10	乙烯 0.98	3-甲基 戊烷 1.45	乙炔 0.71	乙烷 0.78	乙炔 0.74	异戊烷 2.05	异丁烷 1.51	甲苯 1.01

表 2 列出了年平均浓度最高的 10 个物种,分别是丙烷、甲苯、乙烷、正己烷、正丁烷、乙炔、2-甲基戊烷、异丁烷、乙烯和 3-甲基戊烷。

丙烷在各个季节中浓度均最高,全年平均浓度为  $3.6 \times 10^{-9}$ ,主要来源是液化石油气(LPG)<sup>[21]</sup>;乙烯和异戊二烯在烯烃中浓度最高,乙烯在机动车和

石油化工排放中也占有较大比例,异戊二烯主要来自于植物天然源;甲苯和乙苯则是芳香烃浓度最高的两个物种,在工业溶剂涂料中贡献很大<sup>[22]</sup>。此外,这些高浓度物种中乙烷在天然气和柴油车尾气排放、正己烷在工业溶剂都占有较大比例,正丁烷、异丁烷、乙炔主要来自于机动车排放,2-甲基戊烷和 3-甲基戊烷在液体汽油中含量较为丰富<sup>[23-24]</sup>。

表 2 中不同城市间的 NMHCs 浓度水平相差较大,在深圳和济南,芳香烃中甲苯含量最高;而南京芳香烃中苯的含量最高,丙烷和乙烷的浓度在各区域浓度水平均较高。对比 2010 年深圳大气芳香烃的主要物种,可以发现 2010 年深圳各物种普遍高于其他城市,这与当时深圳大

量家具制造业、建筑涂料使用以及制鞋业等重点 VOCs 排放行业的贡献有关,这些行业对芳香烃的贡献非常明显<sup>[25]</sup>;而当前深圳产业结构升级和大气调控措施加强,因此当前芳香烃类的物种浓度大幅下降<sup>[26]</sup>。而丙烷浓度较高与深圳 LPG 加大使用有关。

## 2.2 物种间相关性分析

从图 2 的各类别总浓度与 CO 之间的相关性可以看出,炔烃、烷烃与 CO 的相关性较好,说明乙炔和烷烃中的大部分物种与 CO 同源,主要来自于机动车尾气排放。芳香烃、烯烃与 CO 的相关性相对略低,说明部分芳香烃和烯烃物种除了来自于机动车尾气排放外,还受其他源较大影响。

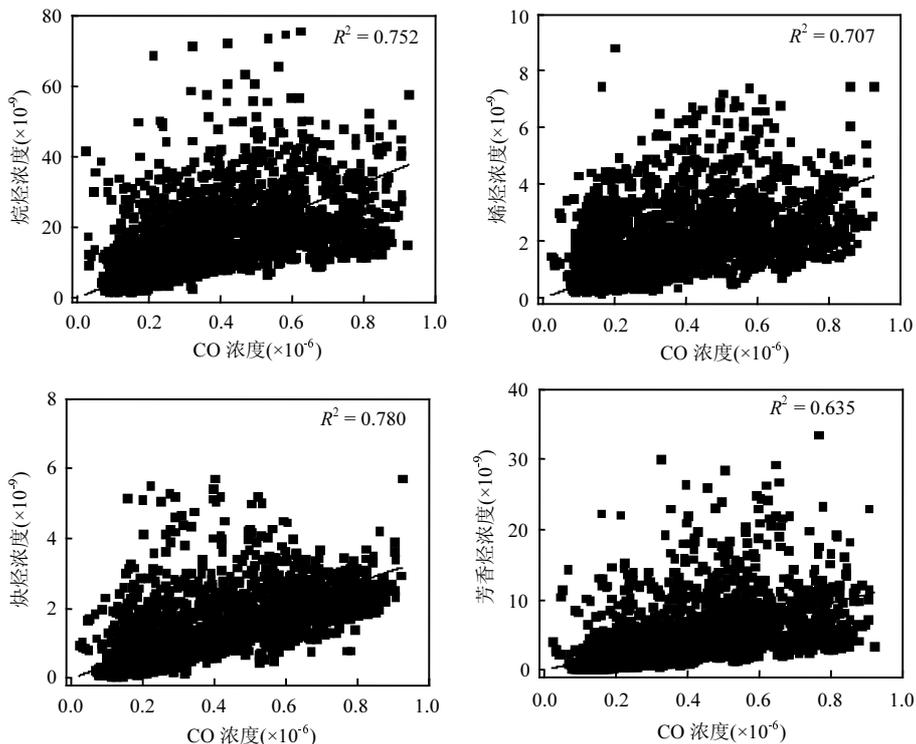


图 2 烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃与 CO 之间的相关性比较

Fig.2 Correlation between CO and alkanes, alkenes, alkynes, and aromatic hydrocarbons

甲苯和苯的相关关系常用于说明城市交通源的排放特征<sup>[30-31]</sup>。图 3 中甲苯和苯的相关性在冬春季相关性好于夏秋季,而在夏秋季节甲苯的浓度高值较多,导致甲苯/苯的斜率更高。甲苯/苯的比值在四季都远高于机动车排放的测定值

<sup>[32]</sup>,说明深圳大气中溶剂挥发源对甲苯以及其他类 VOCs 的贡献可能很大。甲苯在夏秋季的高值一方面是由于夏秋季节气温较高,有机溶剂更易挥发至大气中导致浓度增加,另一方面,夏季周边建筑工地可能存在施工喷涂,大量的溶剂挥发

造成局部时段甲苯浓度上升,进一步说明溶剂的使用和挥发是甲苯的一个重要来源.丙烷与正丁烷之间的相关系数较好, $R^2$  为 0.91~0.95, $k$  为 1.52~2.21,与机动车排放的比值 0.49~1.91 接近<sup>[13]</sup>,同时与液化石油气(LPG)中丙烷(~60%)和正丁烷(~40%)的比值 1.5 左右接近<sup>[30]</sup>,说明深圳大气这两个物种主要来自于 LPG 机动车的贡献.

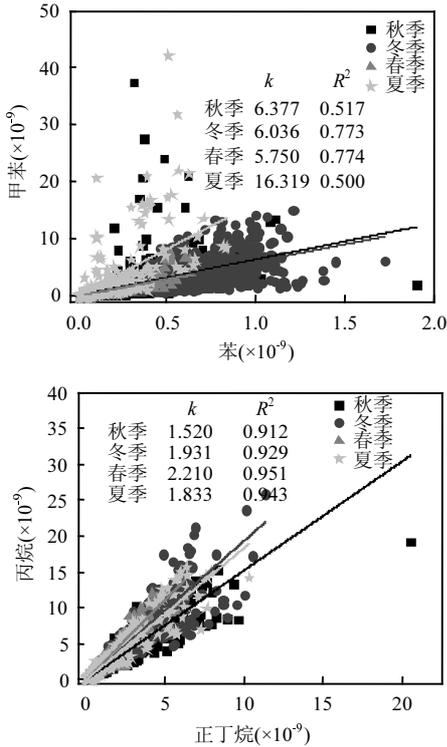


图3 深圳四季大气中甲苯与苯、丙烷与正丁烷的相关性  
Fig.3 Correlation of toluene/benzene and propane/butane during the four seasons in Shenzhen

### 2.3 日变化规律分析

**2.3.1 O<sub>3</sub>、NO<sub>x</sub>、总 NMHCs 全年日变化** NO<sub>x</sub> 和 VOCs 是 O<sub>3</sub> 的前体物,在高温、光照强度大以及风速低的情况下更容易生成 O<sub>3</sub><sup>[33]</sup>.从图 4 可以看出,受大气边界层变化影响,总 NMHCs 与 NO<sub>x</sub> 的日变化均呈现出早晚 2 个峰值,中午一个低谷的特征,而 O<sub>3</sub> 的日变化则呈现出白天一个峰值,这主要是由于中午在光化学反应的作用下 NO<sub>x</sub> 和 VOCs 快速消耗,使得 O<sub>3</sub> 得到积累.值得注意的

是,上午 NO<sub>x</sub> 因为交通早高峰在 7:00~8:00 时出峰,而总 NMHCs 的出峰时间在 10:00~11:00 时,说明交通源并非总 NMHCs 的主导来源,而白天的工业活动可能对 NMHCs 有重要影响<sup>[34]</sup>.

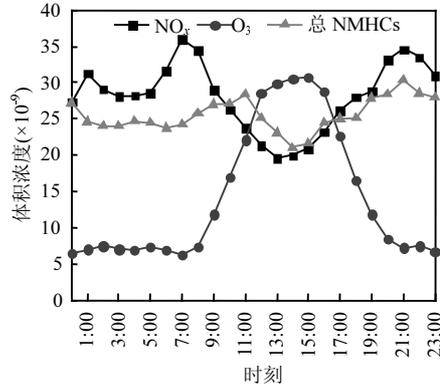


图4 深圳全年 O<sub>3</sub>、NO<sub>x</sub>、总 NMHCs 日变化  
Fig.4 Annual mean diurnal variations of O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, and total NMHCs in Shenzhen

**2.3.2 典型物种的全年日变化** 图 5 为全年浓度水平较高的 12 个典型物种的日变化图,它们在所监测的总 NMHCs 浓度水平中贡献了 75.6%.

丙烷、乙烷、正己烷、正丁烷、异丁烷、2-甲基戊烷和 3-甲基戊烷这 7 个物种在总烷烃中一共贡献了 77.3%.从这 7 个物种的日变化来看,丙烷、乙烷、正丁烷和异丁烷在日变化中呈现出明显的双峰特征,与深圳早晚交通高峰时间段基本一致,说明机动车尾气的排放对这 4 个物种的贡献较大.2-甲基戊烷、3-甲基戊烷和正己烷日变化规律相似,具有一定的同源特征,凌晨浓度较低,日间至晚上浓度总体上不断累积升高,说明其可能主要同工业生产活动相关.

烯烃中乙烯和异戊二烯是浓度最高的两个物种,在总烯烃中分别贡献了 58.3%和 15.9%.乙烯和乙炔的日变化特征接近,浓度水平也呈现典型的早晚较高午间较低特征,说明乙烯和乙炔主要来自机动车排放.异戊二烯在白天呈现一个大的单峰,这主要来自于白天植物光合作用释放产生:随着白天光照强度增强和气温升高,植物产生较多的异戊二烯并在正午达到峰值;傍晚随着日落光照强度和温度都下降,异戊二烯的浓度水平也呈现出快速下降的趋势.

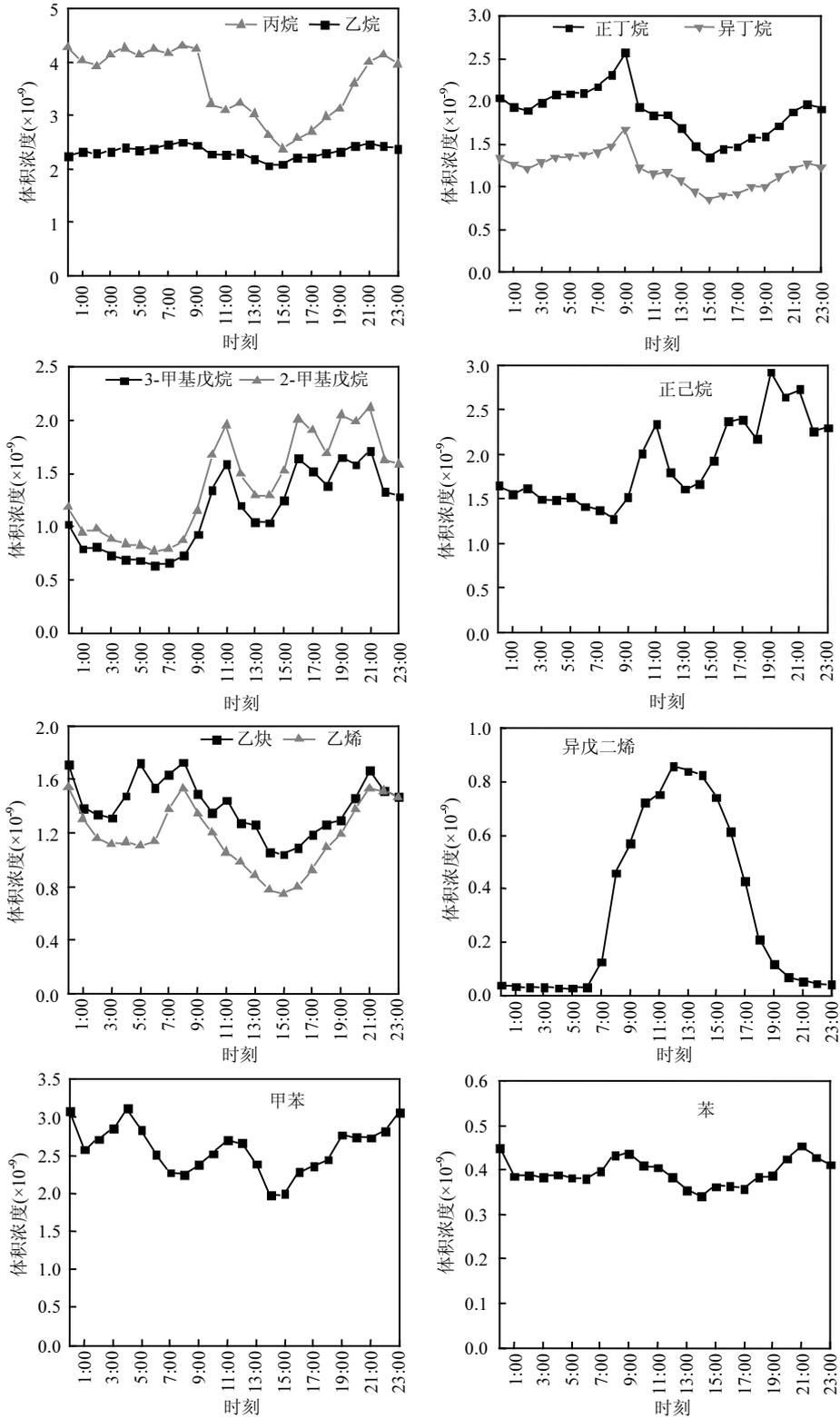


图 5 深圳典型物种日变化

Fig.5 Annual mean diurnal variations of typical species in Shenzhen

甲苯和苯在总芳香烃中分别贡献了 54.5% 和 8.3%。从各自的日变化来看,苯呈现典型的早晚较高午间较低特征,说明深圳大气中苯的来源主要与机动车排放相关。甲苯的日变化情况则较为复杂,在凌晨和上午累积出明显的峰值,推测与复杂的工业和建筑活动有关。

### 3 结论

3.1 深圳大气 NMHCs 呈现秋冬季浓度较高,春夏季浓度较低的特点,总 NMHCs 年均浓度为  $23.6 \times 10^{-9}$ , 烷烃的浓度水平最高(65.4%~74.7%), 其次是芳香烃(13.3%~21.7%)和烯烃(7.1%~11.6%)。丙烷、甲苯、乙烷、正己烷、正丁烷、乙炔、2-甲基戊烷、异丁烷、乙烯和 3-甲基戊烷是浓度最高的 10 个物种。

3.2 物种间的相关性分析表明,烷烃与炔烃主要来自于机动车尾气排放,部分芳香烃和烯烃物种除了来自机动车尾气排放外,还有较多部分来自其它源的贡献。丙烷与正丁烷主要来自于液化石油气(LPG)车,甲苯除了来自于机动车尾气排放外,还存在其它工业源的影响。

3.3 典型物种的日变化规律进一步说明深圳大气中 NMHCs 主要受到机动车尾气排放、溶剂挥发以及植物释放等多种来源的显著影响。

#### 参考文献:

- 广东省环境保护厅. 粤港澳珠江三角洲区域空气监测网络 2016 年监测结果报告 [Z]. 2017.
- 廖志恒, 孙家仁, 范绍佳, 等. 2006-2012 年珠三角地区空气污染变化特征及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(2): 329-336.
- 李丽云, 邓雪娇, 何启华, 等. 近 35 年广东省区域灰霾天气过程的变化特征及突变分析 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(8): 2297-2303.
- 陆思华, 邵敏, 王鸣. 城市大气挥发性有机物(VOCs)测量技术 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 1-3.
- 深圳市人居环境委员会. 2016 年度深圳市环境状况公报 [Z]. 2017.
- 张军科, 王跃思, 吴方堃, 等. 贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究 [J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4159-4166.
- 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.
- An J L, Wang J X, Zhang Y X, et al. Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in an Urban Environment at the Yangtze River Delta, China [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2017, 72(3): 335-348.
- 谢放尖, 李文青, 牟莹莹, 等. 南京青奥期间污染减排对空气质量影响研究 [J]. 环境科学与管理, 2016, 41(11): 94-98.
- 杨干, 魏巍, 吕兆丰, 等. APEC 期间北京市城区 VOCs 浓度特征及其对 VOCs 排放清单的校验 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(5): 1297-1304.
- Wang S L, Gao J, Zhang Y C, et al. Impact of emission control on regional air quality: An observational study of air pollutants before, during and after the Beijing Olympic Games [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(1): 175-180.
- 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.
- Li Y Q, Li J, Wu R R, et al. Characterization and source identification of ambient volatile organic compounds (VOCs) in a heavy pollution episode in Beijing, China [A]. The 24<sup>th</sup> International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Air Pollution [C]. WIT Press, 2016, 1: 249-259.
- Yuan B, Chen W T, Shao M, et al. Measurements of ambient hydrocarbons and carbonyls in the Pearl River Delta (PRD), China [J]. Atmospheric Research, 2012, 116: 93-104.
- Shao P, An J L, Xin J Y, et al. Source apportionment of VOCs and the contribution to photochemical ozone formation during summer in the typical industrial area in the Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Research, 2016, 176: 64-74.
- 丁洁然, 景长勇. 唐山夏季大气 VOCs 污染特征及臭氧生成潜势 [J]. 环境工程, 2016, 34(6): 130-135.
- 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.
- 张露露, 蒋卫兵, 张元勋, 等. 上海市青浦区大气挥发性有机化合物的特征 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(12): 3550-3561.
- 王琴, 刘保献, 张大伟, 等. 北京市大气 VOCs 的时空分布特征及化学反应活性 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(10): 3636-3646.
- 深圳市气象局(台). 深圳市气候概况及四季特征 [Z].
- Guo H, Wang T, Blake D R, et al. Regional and local contributions to ambient non-methane volatile organic compounds at a polluted rural/coastal site in Pearl River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(13): 2345-2359.
- 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.
- 陆思华, 白郁华, 张广山, 等. 机动车排放及汽油中 VOCs 成分谱特征的研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2003, 39(4): 507-511.
- Tzompa-Sosa Z A, Mahieu E, Franco B, et al. Revisiting global

- fossil fuel and biofuel emissions of ethane [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017,122(4):2493–2512.
- [25] 余宇帆,卢 清,郑君瑜,等.珠江三角洲地区重点 VOC 排放行业的排放清单 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(2):195–201.
- [26] 深圳市人民政府.深圳市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要 [Z]. 2016.
- [27] 朱少峰,黄晓锋,何凌燕,等.深圳大气 VOCs 浓度的变化特征与化学反应活性 [J]. *中国环境科学*, 2012,32(12):2140–2148.
- [28] An J L, Zhu B, Wang H L, et al. Characteristics and source apportionment of VOCs measured in an industrial area of Nanjing, Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 97:206–214.
- [29] Wang N, Li N, Liu Z C, et al. Investigation of chemical reactivity and active components of ambient VOCs in Jinan, China [J]. *Air Quality Atmosphere and Health*, 2016,9(7):785–793.
- [30] Garzón J P, Huertas J I, Magaña M, et al. Volatile organic compounds in the atmosphere of Mexico City [J]. *Atmospheric Environment*, 2015,119:415–429.
- [31] 王宇亮,张玉洁,刘俊峰,等.2009 年北京市苯系物污染水平和变化特征 [J]. *环境化学*, 2011,30(2):412–417.
- [32] Nelson, P F Quigley S M. The hydrocarbon composition of exhaust emitted from gasoline fuelled vehicles [J]. *Atmospheric Environment*, 1984,18(1):79–87.
- [33] Chen S P, Su Y C, Chiu C J, et al. Inter-comparison of network measurements of non-methane organic compounds with model simulations [J]. *Atmospheric Environment*, 2015,122:94–102.
- [34] 庄 欣,黄晓锋,陈多宏,等.基于日变化特征的珠江三角洲大气污染空间分布研究 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(6):2001–2006.

**作者简介:** 朱 波(1990-),男,浙江兰溪人,硕士研究生,主要从事大气环境化学 VOCs 研究.已发表论文 1 篇.

## 《中国环境科学》2011~2014 年发表的论文中 20 篇入选“领跑者 5000”提名论文

《中国环境科学》2011~2014 年发表的论文中有 20 篇入选“精品期刊顶尖论文平台——领跑者 5000”提名论文。“领跑者 5000(F5000)”平台由中国科学技术信息研究所于 2013 年建设,旨在集中展示中国精品科技期刊上发表的最高端的学术研究成果,将与国际和国内重要检索系统链接,扩大论文影响.该平台将与汤森路透公司合作,拟利用 WOK 国际检索系统平台,与 SCI 数据库在同一平台内实现文献链接和国际引文检索,在更大范围内向世界科技同行展示和推广中国最重要的科研成果.提名论文均为 2011~2014 年在学科领域内被引率排名居前的论文.本次环境学科共有 65 篇文章入选“领跑者 5000”提名论文.