

· 解析评价 ·

春季广州城区空气中 VOCs 来源解析

周炎, 岳玎利, 张涛

(广东省环境监测中心, 国家环境保护区域空气质量监测重点实验室, 广东 广州 510308)

摘要:2013年4月在广州市区对大气中挥发性有机化合物(VOCs)进行了观测,对其变化特征和来源进行了分析。结果表明,观测期间测得的VOC总平均混合比为 41.35×10^{-9} ,表现为烷烃>芳香烃>烯烃>炔烃;利用PMF解析出观测时段内影响广州市区的9个VOCs主要来源,各源占比情况依次为:LPG排放>老化VOC>汽油挥发>石化、未知源>汽油车排放>油漆溶剂>柴油车排放>天然源;与机动车相关和工业相关的来源分别占到了大气VOCs的46.8%和21.0%。

关键词:挥发性有机物;来源解析;正交矩阵因子分析法;广州

中图分类号:X511

文献标志码:B

文章编号:1674-6732(2017)01-0042-06

Source Apportionment of Spring Ambient Volatile Organic Compounds in Guangzhou

ZHOU Yan, YUE Ding-li, ZHANG Tao

(Guangdong Environmental Monitoring Center, State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Air Quality Monitoring, Guangzhou, Guangdong 510308, China)

Abstract: Atmospheric VOCs were measured at Guangzhou in April 2013. The variation pattern and emission sources were analyzed. The average concentration of total VOCs observed was 41.3×10^{-9} , which showed a descending order of alkane > aromatic hydrocarbon > alkene > alkyne. Source analysis of VOCs by PMF showed that the LPG emission > aged VOC > gasoline vapor > petrochemical industry, unknown source emission > gasoline vehicle emission > solvent use source > diesel vehicle emission > biogenic emission. The sources related to vehicle emission and industrial activities accounted for 46.8% and 21.0% of total VOCs respectively, it showed control measures to vehicle and industry should be strengthened.

Key words: VOCs; Source apportionment; PMF; Guangzhou

挥发性有机物(VOCs)是大气对流层非常重要的痕量组分,在大气化学反应过程中扮演着极其重要的角色,对一些区域环境问题,如光化学烟雾、二次有机污染、背景大气的氧化能力等都有重要影响。大气对流层中许多重要的二次污染物如臭氧、过氧化物、醛、过氧酰基硝酸酯(PANs)和二次有机气溶胶的形成都与VOCs密切相关。研究VOCs大气化学对理解对流层化学过程非常重要。一些VOCs组分对人体健康存在潜在的威胁,如芳香烃、1,3-丁二烯、醛类等产生刺激性、毒性和致癌作用。研究大气中VOCs分布规律、来源、迁移转化及其对人体健康影响逐渐成为国内外研究的焦点。

当前国外大气VOCs的研究主要集中在2个方面:一是确定影响空气质量的关键活性VOCs组分及其对臭氧生成的相对贡献^[1-12],这是认识区域大气污染的核心问题之一;二是利用多种测量和

分析手段揭示VOCs的主要来源^[13-17],考察流动源、工业源、生物质燃烧等人为源和天然源对城市及其周边地区活泼VOCs的影响,在此基础上探讨当地排放和区域传输对光化学污染的作用等。

在珠江三角洲地区臭氧浓度居高不下的背景下,开展VOCs浓度变化特征研究,识别其影响空气质量的关键活性组分,探索其关键来源,可为制定控制对策提供科学依据。

1 研究方法

1.1 采样与分析

采样时间为2013年4月1—22日。观测地点

收稿日期:2016-06-02;修订日期:2016-06-27

基金项目:科技支撑基金资助项目(2014BAC21B01);珠江科技新星专项基金资助项目(2015-06-151009)

作者简介:周炎(1985—),女,高级工程师,硕士,从事大气自动监测与数据分析工作。

位于广州市区广东环境监控中心楼顶的磨碟沙子站,采样高度约为 50 m,在这个高度上污染物基本混合均匀。广州市的石油化工企业、船舶和汽车制造企业多集中于黄埔区,距离本观测点约 12 km;观测点毗邻猎德大桥,周边有多条交通繁忙干线,点位向东有科韵路(约 3 km),向南 500 m 有新港路,向西有广州大道(约 2 km),向北 3 km 有黄埔大道,该观测点可以捕捉到工业源和交通源的共同影响,见图 1。



图 1 观测点位

采用 TH-300 B 大气挥发性有机物快速在线监测系统(武汉天虹)对 VOCs 进行在线观测,每次采样 5 min,采样流量为 60 mL/min,每个样品的采样分析周期为 1 h。该系统以冷冻的方式去除空气样品中的水分,利用捕集柱对 VOCs 样品进行捕集,分别采用 FID 检测 C2~C5 的碳氢化合物和 MS 检测 C5~C10 的碳氢化合物;FID 部分的分离柱为 20.0 m × 0.32 mm × 3.0 μm 的 PLOT 柱,MS 部分的分离柱为 60.0 m × 0.25 mm × 1.4 μm 的 DB-624 柱。

利用外标法对仪器进行校准,标准气体为 Spectra Gases 公司生产的 56 种 VOCs,各目标化合物定量标准曲线的 R^2 值 > 0.99。

1.2 数据前处理与模型条件设置

正交矩阵因子分析法(Positive Matrix Factorization,简称 PMF)广泛地应用于污染物源解析,是一种常用的受体模型分析法。基本 PMF 模型利用美国环保署(EPA)发布的 PMF 3.0 对该次检出的 VOCs 进行源解析。

模型输入时,去除有 25% 浓度低于检出限或未检出的 VOCs 物质,低于检出限的以该物质的 1/2 检出限代替^[18],并以 5/6 检出限代替其相应的

不确定度。共解析 9 个主要污染源,模型设置不确定度为 0%,解析得 Q 值为 5 110(理论 Q 值为 4 900);各个源的相互关系不明显;除十一烷、苯乙烯和正乙烷外,其余物质的模拟值与观测值的相关系数均 > 0.88,模拟结果总体较好。

2 结果与讨论

2.1 VOCs 组成及浓度水平

不同类型 VOCs 占比见图 2。观测中共检出 45 种 VOCs,其中烷烃 25 种,烯烃 5 种,芳香烃 14 种及炔烃 1 种(乙炔),测得的 VOCs 混合比小时值为 $6.52 \times 10^{-9} \sim 161.71 \times 10^{-9}$,总平均混合比为 41.35×10^{-9} 。烷烃、烯烃、芳香烃、炔烃的平均混合比分别为 $(25.05 \pm 20.83) \times 10^{-9}$, $(3.91 \pm 3.22) \times 10^{-9}$, $(9.90 \pm 8.07) \times 10^{-9}$ 和 $(2.49 \pm 1.53) \times 10^{-9}$,分别占总 VOCs 的 60.5%、9.5%、24.0% 和 6.0%。

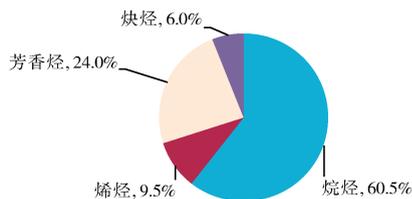


图 2 不同类型 VOCs 占比

将该次观测结果与北京、南京的研究结果进行了对比,发现各城市大气总体 VOCs 混合比大致相当,而与广州 2009 年的结果相比,广州城区大气 VOCs 混合比有所下降,表明广州的减排措施取得一定成效。见表 1。

观测期间各 VOCs 组分平均混合比见表 2。在测得的所有 VOCs 中,平均混合比排前 10 位的依次为:丙烷 $(6.32 \pm 6.35) \times 10^{-9}$,甲苯 $(4.82 \pm 3.94) \times 10^{-9}$,正丁烷 $(3.68 \pm 3.38) \times 10^{-9}$,乙烷 $(3.36 \pm 1.63) \times 10^{-9}$,异丁烷 $(3.01 \pm 2.83) \times 10^{-9}$,乙烯 $(2.77 \pm 2.19) \times 10^{-9}$,乙炔 $(2.49 \pm 1.45) \times 10^{-9}$,正戊烷 $(1.68 \pm 1.64) \times 10^{-9}$,乙苯 $(1.32 \pm 1.20) \times 10^{-9}$,异戊烷 $(1.04 \pm 1.02) \times 10^{-9}$,这几种物质混合比之和对总 VOCs 混合比的贡献为 73.8%。Liu^[23] 在 2008 年的研究结果指出广州市大气中丙烷较高主要是由于液化石油气(LPG)公交车排放引起,而该次测得丙烷也远高于其他物质,或表明 LPG 公交车仍是广州市重要的 VOCs 排放源之一。

表1 不同城市大气 VOCs 混合比比较

地区	研究时间	混合比范围	文献
广州城区	2013年4月	$6.52 \times 10^{-9} \sim 161.71 \times 10^{-9}$ (小时值) 41.35×10^{-9} (均值)	该研究
广州番禺(郊区)	2011年6月—2012年4月	$40.99 \times 10^{-9} \sim 65.40 \times 10^{-9}$ (均值)	[19]
广州城区	2009年7月	$40 \times 10^{-9} \sim 259 \times 10^{-9}$ (小时值)	[20]
北京	2008年6—9月	34.38×10^{-9} (上午均值) 27.13×10^{-9} (下午均值)	[21]
南京郊区	2011年3月—2012年2月	43.52×10^{-9} (均值)	[22]

表2 观测期间 VOCs 组分平均混合比

类别	组分	平均值 / 10^{-9}	标准偏差 / 10^{-9}	变化范围 / 10^{-9}	最低 检出限 / 10^{-9}	
炔烃	乙炔	2.49	1.45	7.52 ~ 0.52	0.04	
	丙炔	3.36	1.63	12.15 ~ 0.84	0.08	
	丁炔	6.32	6.35	36.30 ~ 0.98	0.04	
	异丁炔	3.01	2.83	16.97 ~ 0.16	0.03	
	正丁炔	3.68	3.38	19.56 ~ 0.36	0.03	
	正戊炔	1.68	1.64	11.18 ~ 0.08	0.02	
	异戊炔	1.04	1.02	6.40 ~ 0.05	0.02	
	2,3-二甲基丁炔	0.89	0.84	5.33 ~ 0.05	0.03	
	2-甲基戊炔	0.61	0.69	4.15 ~ 0.03	0.03	
	3-甲基戊炔	0.69	0.63	3.52 ~ 0.04	0.03	
	正己炔	0.96	1.00	7.05 ~ 0.06	0.04	
	2,4-二甲基戊炔	0.08	0.09	0.45 ~ 0.00	0.04	
	甲基环戊炔	0.32	0.30	1.47 ~ 0.01	0.04	
	2-甲基己炔	0.44	0.50	3.04 ~ 0.01	0.03	
	环己炔	0.22	0.23	1.23 ~ 0.01	0.02	
	2,3-二甲基戊炔	0.16	0.17	1.02 ~ 0.01	0.03	
	3-甲基己炔	0.46	0.53	3.34 ~ 0.02	0.03	
	2,2,4-三甲基戊炔	0.02	0.02	0.08 ~ 0.01	0.03	
	正庚炔	0.42	0.52	3.36 ~ 0.02	0.03	
	甲基环戊炔	0.22	0.26	1.61 ~ 0.01	0.03	
烷烃	2-甲基庚炔	0.09	0.11	0.70 ~ 0.01	0.02	
	3-甲基庚炔	0.07	0.09	0.56 ~ 0.00	0.02	
	辛炔	0.13	0.14	0.76 ~ 0.01	0.02	
	正壬炔	0.06	0.06	0.29 ~ 0.01	0.02	
	正癸炔	0.08	0.06	0.33 ~ 0.01	0.02	
	十一炔	0.05	0.05	0.25 ~ 0.01	0.02	
	烯烃	乙烯	2.77	2.19	11.69 ~ 0.25	0.07
		丙烯	0.69	0.67	3.81 ~ 0.05	0.03
		1-丁烯	0.34	0.37	2.11 ~ 0.05	0.02
		异戊二烯	0.07	0.07	0.42 ~ 0.00	0.02
	1-己烯	0.04	0.03	0.27 ~ 0.01	0.04	
芳香烃	苯	0.95	0.55	3.55 ~ 0.29	0.03	
	甲苯	4.82	3.94	21.17 ~ 0.91	0.03	
	乙苯	1.32	1.20	5.44 ~ 0.12	0.02	
	间/对二甲苯	0.93	0.87	4.45 ~ 0.09	0.02	
	邻二甲苯	0.71	0.67	3.37 ~ 0.06	0.02	
	苯乙烯	0.34	0.35	1.57 ~ 0.02	0.02	
	异丙苯	0.03	0.03	0.14 ~ 0.00	0.02	
	正丙苯	0.07	0.07	0.34 ~ 0.01	0.02	
	3-乙基甲苯	0.19	0.18	0.91 ~ 0.02	0.04	
	4-乙基甲苯	0.10	0.09	0.43 ~ 0.01	0.04	

续表

类别	组分	平均值 / 10^{-9}	标准偏差 / 10^{-9}	变化范围 / 10^{-9}	最低 检出限 / 10^{-9}
芳香烃	1,3,5-三甲苯	0.06	0.06	0.30 ~ 0.01	0.02
	2-乙基甲苯	0.08	0.07	0.38 ~ 0.01	0.02
	1,2,4-三甲苯	0.24	0.22	1.09 ~ 0.03	0.02
炔烃	1,2,3-三甲苯	0.06	0.06	0.29 ~ 0.01	0.02
	炔烃	2.49			
烷烃	炔烃	25.05			
烯烃	炔烃	3.91			
芳香烃	芳香烃	9.90			
总 VOCs	总 VOCs	41.35			

甲苯与苯相关关系见图3。由图3可见,甲苯和苯线性关系较好,回归斜率为6.037,高于文献[24]机动车与典型城市的特征值(2~3),表明本地可能同时受机动车和有机溶剂挥发源影响。

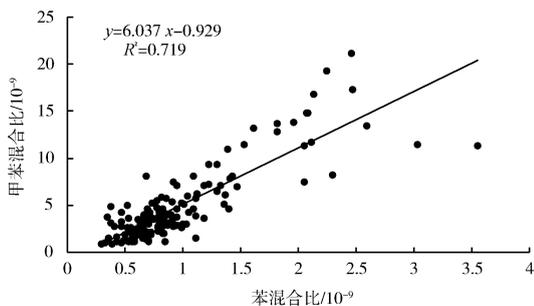


图3 观测期间甲苯与苯相关关系

2.2 VOCs 日变化特征

烷烃、芳香烃和烯烃日间浓度高,特别是芳香烃,日间浓度上升幅度较大,而烯烃最大值出现在午后,可能与天然源排放增加有关;炔烃全天变化基本较平稳,见图4。从VOCs总平均混合比日变化情况来看,共有3个较为明显的峰值。第一个峰值出现在06:00—07:00,夜间虽VOCs排放较少,但大气边界层低,随着边界层逐渐抬升,大气中VOCs总平均混合比开始下降,而在06:00,VOCs

混合比开始骤然升高,而导致其值骤升的烷烃,芳香烃、烯烃浓度基本不变,由于此时城市交通尚未进入繁忙时段,仅有少量重型柴油车由于白天交通管制而在较早时间出行,此时烷烃的骤然升高可能与柴油车或汽油挥发源有关。09:00 VOCs 混合比再次上升,到 11:00 达到日间最大值,为第二个峰值;18:00 VOCs 混合比突然上升,到 21:00 仍保持较高值,为第三个峰值;峰值的出现时间与城市交通早、晚高峰时间吻合,且明显由烷烃和芳香烃同步升高引起,特别是芳香烃,最高约升高 2 倍,这 2 个峰值的出现可能受机动车和工业活动共同影响。

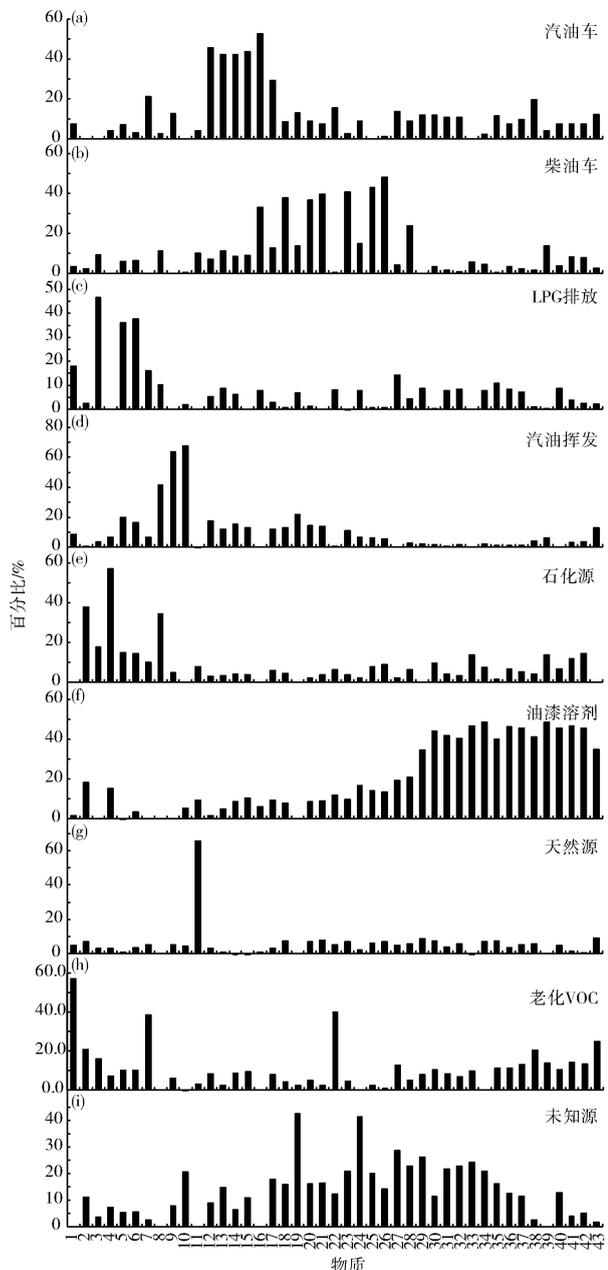


图4 VOCs 混合比日变化特征

2.3 源解析结果

基于 VOCs 混合比,利用 PMF 解析得到的 9 个源谱因子见图 5 (a) (b) (c) (d) (e) (f) (g) (h) (i)。

C6 ~ C7 烷烃在 (a) 源谱因子出现的比例较高,特别是 2,4 - 甲基戊烷、2,3 - 二甲基丁烷、正己烷、2 - 甲基戊烷和 3 - 甲基戊烷,分别有 52.7%、45.7%、43.9%、42.2% 和 42.1% 出现在 (a) 源中,基本可认为该源受汽油车排放影响较大。(b)(c) 源谱因子中分别含有较多的甲基己烷、甲基庚烷等 C7 ~ C8 支链烷烃和丙烷 (46.5%)、正丁烷 (37.5%)、异丁烷 (36.2%),可初步判断这两个源分别为柴油车排放源和 LPG 排放源^[25]。约 65% 的异戊烷和正戊烷出现在 (d) 源谱因子中,一般认为 (d) 源谱因子为汽油挥发源^[26]。除天然排放的异戊二烯和苯乙烯外,其余烯烃在 (e) 源谱因子中的含量较高,占到总烯烃的 43% 以上,特别是丙烯、乙烯和丁烯,分别有 56.9%、37.7% 和 34.6% 出现在这一个源中,可判断该源为石化源。(f) 源谱因子中存在多种高含量



1—乙烷; 2—乙烯; 3—丙烷; 4—丙烯; 5—异丁烷; 6—正丁烷; 7—乙炔; 8—1-丁烯; 9—正戊烷; 10—异戊烷; 11—异戊二烯; 12—2,3-二甲基丁烷; 13—2-甲基戊烷; 14—3-甲基戊烷; 15—正己烷; 16—2,4-二甲基戊烷; 17—甲基环戊烷; 18—2-甲基己烷; 19—环己烷; 20—2,3-二甲基庚烷; 21—3-甲基己烷; 22—苯; 23—正庚烷; 24—甲基环戊烷; 25—2-甲基庚烷; 26—3-甲基庚烷; 27—甲苯; 28—辛烷; 29—乙苯; 30—正壬烷; 31—间/对二甲苯; 32—邻二甲苯; 33—苯乙烯; 34—异丙苯; 35—正丙苯; 36—3-乙基甲苯; 37—4-乙基甲苯; 38—正癸烷; 39—1,3,5-三甲苯; 40—2-乙基甲苯; 41—1,2,4-三甲苯; 42—1,2,3-三甲苯; 43—十一烷。

图5 解析得到的9个源成分谱因子

比例的芳香烃,可判断其来源为工业和建筑喷涂过程中的油漆溶剂^[27]。异戊二烯为天然源的重要示踪物,约 70% 在 (g) 源谱因子中出现,且该因子中其余物种的含量均较低。(h) 源谱因子中乙烷、乙炔和苯含量最大,这几种物质的化学活性较低,可

认为该源为老化 VOCs 源^[28]。(i) 源谱因子中未含有明显的示踪物种, 标记为未知源。

源分担率日变化特征见图 6。由图 6 可见, 汽油车排放源和 LPG 排放源的变化特征较类似, 夜间占比比较低, 08:00 后逐渐升高, 与城市交通繁忙情况相符。柴油车排放源在清晨前占比较高, 日间占比较低, 这与广州市白天重型车限行有关。汽油挥发源和石化源的占比日变化较平缓, 日间有轻微下降, 这可能与这 2 类源的排放较为稳定有关。油漆溶剂源在工作时段的占比明显高于非工作时段, 进一步表明了工业排放 VOCs 对广州市大气环境的影响。天然源排放占比在午间迅速增加, 最大可占到总 VOCs 的 20% 左右。观测时段广州城区 VOCs 的主要来源及占比见图 7。

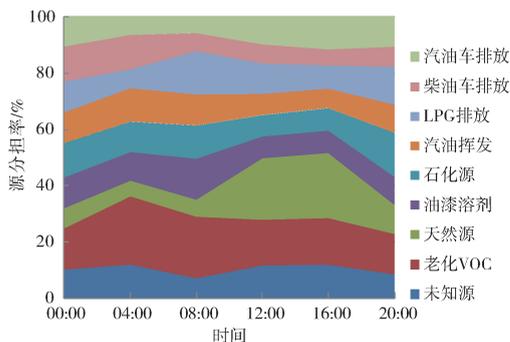


图 6 源分担率日变化特征

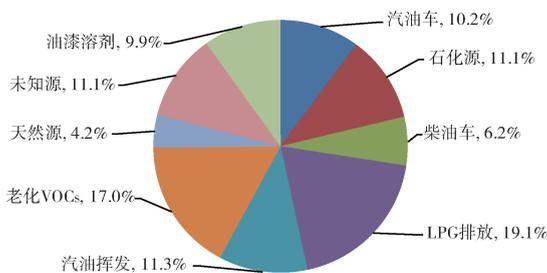


图 7 VOCs 主要来源

由图 7 可见, 占比最大的源为 LPG 排放源, 占到了 19.1%, 其次为老化 VOC (17.0%), 汽油挥发、汽油车排放、石化和油漆溶剂排放源的占比也在 10% 左右, 天然源的占比最小 (4.2%), 11.0% 的 VOCs 来源未知。观测共解析得到的 4 类机动车排放相关的源, 分别为 LPG 排放、汽油车排放、柴油车排放和汽油挥发源, 占到了总 VOCs 的 46.8%, 可见广州市区机动车是最为重要的 VOCs 排

放源, 特别是 LPG 公交车排放, 应加强机动车 VOCs 排放控制。石化和油漆溶剂的占比之和达到了 21.0%, 这 2 个源均为工业源, 表明广州市区受工业 VOCs 排放影响亦不可忽视。

3 结论

(1) 观测期间测得的 VOCs 总平均混合比为 41.35×10^{-9} , 与 2011 年 3 月—2012 年 2 日南京市测得平均值相当, 其中 4 类 VOCs 的平均值由大到小分别为烷烃 > 芳香烃 > 烯烃 > 炔烃;

(2) VOCs 总平均混合比日变化共有 3 个较为明显的峰值。第 1 个峰值出现在清晨 06:00—07:00, 主要由烷烃值升高引起; 第 2、3 个峰值分别出现在 09:00—11:00 和 18:00—21:00, 与城市交通早、晚高峰时间吻合, 且明显由烷烃和芳香烃同步升高引起, 特别是芳香烃, 最高约升高 2 倍; 第 1 个峰值可能与机动车或汽油挥发源有关, 而第 2、3 个峰值可能受机动车和工业活动影响;

(3) 观测时段内影响广州市区的 9 个 VOCs 主要来源, 各源占比情况依次为: LPG 排放 (19.1%) > 老化 VOCs (17.0%) > 汽油挥发 (11.3%) > 石化 (11.1%)、未知源 (11.1%) > 汽油车排放 (10.2%) > 油漆溶剂 (9.9%) > 柴油车排放 (6.2%) > 天然源 (4.2%);

(4) 4 类与机动车相关的 VOCs 排放源, 分别为 LPG 排放、汽油车排放、柴油车排放和汽油挥发源, 其占比之和占到了大气总 VOCs 的 46.8%, 可见广州市区机动车是最为重要的 VOCs 排放源, 特别是 LPG 公交车排放; 而与工业有关的石化源和油漆溶剂的 VOCs 排放量之和也占到了总 VOCs 的 21.0%, 表明广州市区受工业 VOCs 排放影响也不低; 应加强对机动车和工业 VOCs 排放的控制。

[参考文献]

- [1] ATKINSON R. Gas-phase tropospheric chemistry of organic compounds[J]. Atmospheric Environment, 1990, 24A: 1-41.
- [2] ATKINSON R, WINER A M, PITTS J N. Rate constants for the gas phase reactions of O_3 with the natural hydrocarbons isoprene and α - and β - isoprene[J]. Atmospheric Environment, 1982, 16: 1017-1020.
- [3] CARTER W P L, ATKINSON R. Computer modeling study of incremental hydrocarbon reactivity[J]. Environment Science & Technology, 1989, 23(7): 864-880.
- [4] DERWENT R G, DAVIES T J, DELANEY M, et al. Analysis and interpretation of the continuous hourly monitoring data for 26

- C2 - C8 hydrocarbons at 12 United Kingdom sites during 1996 [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(2): 297 - 312.
- [5] ROEMER M, BUILTJES P, GUICHERIT R, et al. C2—C5 hydrocarbon measurements in the Netherlands 1981 - 1991 [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(22): 3579 - 3595.
- [6] RAPPENGLUCK B, FABIAN P. An analysis of simultaneous online GC measurements of BTEX aromatics at three selected sites in the greater Munich area[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38(10): 1448 - 1462.
- [7] GREENBERG J P, HELMIG D, ZIMMERMAN P R. Seasonal measurements of nonmethane hydrocarbons and carbon monoxide at the Mauna Loa observatory during the Mauna Loa observatory photochemistry experiment 2 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D9): 14581 - 14598.
- [8] SINGH H B, SALAS L, VIEZEE W. Measurement of volatile organic chemicals at selected sites in California[J]. *Atmospheric Environment*, 1992, 26A: 2929 - 2946.
- [9] GOLDAN P D, KUSTER W C, FEHSENFELD F C, et al. Hydrocarbon measurements in the southeastern United States: The rural oxidants in the southern environment (ROSE) program 1990[J]. *Journal of geophysical research: atmospheres*, 1995, 100(D12): 25945 - 25963.
- [10] BLAKE D R, ROWLAND F S. Urban leakage of liquefied petroleum gas and its impact on mexico-city air-quality[J]. *Science*, 1995, 269(5226): 953 - 956.
- [11] GOLDAN P D, KUSTER W C, FEHSENFELD F C. Nonmethane hydrocarbon measurements during the tropospheric photochemistry experiment[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D5): 6315 - 6324.
- [12] MONTZKA S A, TRAINER M, GOLDAN P D, et al. Isoprene and its oxidation products, methyl vinyl ketone and methacrolein, in the rural troposphere [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1993, 98(D1): 1101 - 1111.
- [13] WINKLE J, BLANK P, GLASER K, et al. Ground-based and airborne measurements of nonmethane hydrocarbons in BERLIOZ: Analysis and selected results[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2002, 42(1): 465 - 492.
- [14] HECTOR J, BERNHARD R. Receptor modeling of ambient VOC at Santiago, Chile [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 4243 - 4263.
- [15] PHADNIS M J, CARMICHAEL G R. Transport and distribution of primary and secondary nonmethane volatile organic compounds in east Asia under continental outflow conditions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D17): 22311 - 22336.
- [16] SONG Y, DAI W, SHAO M, et al. Comparison of receptor models for source apportionment of volatile organic compounds in Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2008(156): 174 - 183.
- [17] CHEN C F, LIANG J J. Using a source - receptor approach to characterize the volatile organic compounds from control device exhaust in a science park [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20: 1526 - 1536.
- [18] POLISSAR A V, HOPKE P K, PAATERO P, et al. Atmospheric aerosol over Alaska 2. Elemental composition and sources [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(D15): 19045 - 19057.
- [19] 邹宇, 邓雪娇, 王伯光, 等. 广州番禺大气成分站挥发性有机物的污染特征 [J]. *中国环境科学*, 2013, 33(5): 808 - 813.
- [20] 解鑫, 邵敏, 刘莹, 等. 大气挥发性有机物的日变化特征及在臭氧生成中的作用——以广州夏季为例 [J]. *环境科学学报*, 2009, 29(1): 54 - 62.
- [21] 吴方堃, 王跃思, 安俊琳, 等. 北京奥运时段 VOCs 浓度变化、臭氧产生潜势及来源分析研究 [J]. *环境科学*, 2010(1): 10 - 16.
- [22] 安俊琳, 朱彬, 王红磊, 等. 南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2014, 12(35): 4454 - 4464.
- [23] LIU Y, SHAO M, LU S H, et al. Volatile organic compound (VOC) measurements in the Pearl River Delta (PRD) region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(6): 1531 - 1545.
- [24] 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.
- [25] FUJITA E M. Hydrocarbon source apportionment for the 1996 Paso Del Norte ozone study [J]. *Science of the Total Environment*, 2001(276): 171 - 184.
- [26] TSAI W Y, CHAN L Y, BLAKE D R, et al. Vehicular fuel composition and atmospheric emission in South China: Hong Kong, Macau, Guangzhou, and Zhuhai [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006(6): 3281 - 3288.
- [27] SEILA R L, MAIN H H, ARRIAGA J L, et al. Atmospheric volatile organic compounds measurements during the 1996 Paso Del Norte ozone study [J]. *Science of the Total Environment*, 2001(276): 153 - 169.
- [28] LAU A K H, YUAN Z B, YU J Z, et al. Source apportionment of ambient volatile organic compounds in Hong Kong [J]. *Science of the Total Environment*, 2010(408): 4138 - 4149.

声 明

本刊已加入中国学术期刊网络出版总库、中国学术期刊综合评价数据库、万方数据 - 数字化期刊群、中国核心期刊(遴选)数据库和中文科技期刊数据库。凡被本刊录用的稿件将同时通过因特网进行网络出版或提供信息服务,稿件一经刊用将一次性支付作者著作权使用报酬,如作者不同意将自己的文章被以上期刊数据库收录,请在来稿中声明,本刊将作适当处理。