

王伯光, 张远航, 邵敏, 等. 2008. 广州地区大气中 C<sub>2</sub> ~ C<sub>9</sub> 非甲烷碳氢化合物的人为来源[J]. 环境科学学报, 28(7): 1430 - 1440

Wang B G, Zhang Y H, Shao M, et al. 2008. Sources apportionment of anthropogenic C<sub>2</sub> ~ C<sub>9</sub> non-methane hydrocarbons in the atmosphere of Guangzhou, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 28(7): 1430 - 1440

# 广州地区大气中 C<sub>2</sub> ~ C<sub>9</sub> 非甲烷碳氢化合物的人为来源

王伯光<sup>1</sup>, 张远航<sup>2,\*</sup>, 邵敏<sup>2</sup>, 周炎<sup>1</sup>, 冯志诚<sup>1</sup>

1. 暨南大学环境工程系, 广州 510632

2. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871

收稿日期: 2007-10-28 修回日期: 2008-04-18 录用日期: 2008-05-20

**摘要:** 研究了广州地区 13 种人为源的 C<sub>2</sub> ~ C<sub>9</sub> 非甲烷碳氢化合物的源成分谱, 及其在 2002 年夏季和冬季环境空气中的组成和变化规律. 应用 CMB 8.0 受体模型对各人为源进行了源解析, 得到了该地区人为源的平均浓度贡献率, 分别为: 乙烯化工厂 29.7%, 机动车 24.2%, 加油站 12.1%, 石油加工 9.0%, 电子加工 8.3%, 涂料工艺 4.3%, 工业垃圾焚烧 2.4%, 炼焦 1.9%, 油墨工艺 1.1%, 卷烟加工 0.9%, 制冷工艺 0.7%. 通过对 6 个受体点的源解析, 结果表明乙烯化工工业点源和流动源为该地区 NMHCs 人为源的控制重点, 面源是控制难点.

**关键词:** 广州; 非甲烷碳氢; 人为源; 来源解析

文章编号: 0253-2468(2008)07-1430-11

中图分类号: X511

文献标识码: A

## Sources apportionment of anthropogenic C<sub>2</sub> ~ C<sub>9</sub> non-methane hydrocarbons in the atmosphere of Guangzhou, China

WANG Boguang<sup>1</sup>, ZHANG Yuanhang<sup>2,\*</sup>, SHAO Min<sup>2</sup>, ZHOU Yan<sup>1</sup>, FENG Zhicheng<sup>1</sup>

1. Department of Environmental Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632

2. College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871

Received 28 October 2007; received in revised form 18 April 2008; accepted 20 May 2008

**Abstract:** Compositional profiles of non-methane hydrocarbon compounds (NMHCs) ranging from C<sub>2</sub> to C<sub>9</sub> emitted from 13 anthropogenic emission sources were characterized in the ambient air of Guangzhou in the summer and the autumn of 2002. A source diagnosis using the CMB 8.0 model yielded the relative contributions of anthropogenic emission sources in Guangzhou to NMHCs, i. e., 29.7% from ethene chemistry industries, 24.2% from exhausts from motored vehicles, 12.1% from gas stations, 9.0% from oil refineries, 8.3% from electronics assembly, 4.3% from paint manufacturing, 2.4% from combustion of industrial wastes, 1.9% from coking, 1.1% from printing ink processing, 0.9% from cigarette factories, and 0.7% from production of refrigerators. Source assessments for six receptor sites indicated that ethene chemistry industries and motored vehicles were the most important sources of NMHCs in the city, and non-point sources are difficult to control.

**Keywords:** Guangzhou; non-methane hydrocarbon compounds (NMHCs); anthropogenic source; source apportionment

### 1 引言 (Introduction)

随着经济快速发展和城市化进程加速, 广州地区的空气质量持续恶化. 主要表现为: ①老的燃煤污染尚未有效解决而新的机动车污染接踵而至, 煤

烟型污染与日益恶化的机动车尾气污染相叠加, 大气氧化性增强, 大气污染呈现出复合污染的特征; ②空气中 NO<sub>x</sub> 浓度日益增高, 蓝天少见, 光化学烟雾污染指示剂 O<sub>3</sub> 的浓度高值时有出现, 充斥大气中的挥发性有机物、细颗粒物 (包括硫酸盐、硝酸盐及有

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目 (No. 2006AA06A308); 霍英东青年基金 (No. 104002); 广东省自然科学基金 (No. 5300458)

Supported by the High-Tech Research and Development Program of China (No. 2006AA06A308), the HUO Yingdong Youth Foundation (No. 104002) and the Provincial Natural Science Foundation of Guangdong (No. 5300458)

作者简介: 王伯光 (1970—), 男, 副教授, E-mail: tbongue@jnu.edu.cn; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: yhzhang@pku.edu.cn

Biography: WANG Boguang (1970—), male, associate professor, E-mail: tbongue@jnu.edu.cn; \* Corresponding author, E-mail: yhzhang@pku.edu.cn

毒有害物质)已危及人体健康等(Seinfeld *et al.* 1998; 唐孝炎等,2006; Shao *et al.*, 2006). 在这些问题上,高浓度挥发性有机物是新形势下存在的复合空气污染问题的重要环境影响因子,但其来源却十分复杂. 为此研究 VOC 人为源对环境空气的贡献率是大气污染控制的重要内容.

化学质量平衡受体模型(CMB)较早就应用于研究大气 VOC 来源问题(Scheff, 1993; Fujita, 1995; Gertler, 1996; Elizabeth, 2000; Henry, 2006; Steven, 2007),但由于复杂的多源问题和共线性问题,以及 VOCs 成分具有较强的化学活性,使得研究结果尚存在一定的不确定性. 如何建立一套准确的污染源成分谱,并在模型运行时选取合适的化学组分进行拟合计算,成为该研究方法成功与否的关键.

从 20 世纪 90 年代中期以来我国也开始开展城市大气 VOC 来源的研究,由于一直在源成分谱的研究方面较薄弱,因而应用受体模型进行污染源贡献计算的研究还较少(盛国英等,1999; 王新明等,1999; 彭立新等,2000, 杨丹青等,2001; 王伯光等,2002; 陆思华等,2006). 本研究在考察广州地区 13 种 NMHCs (C2 ~ C9) 的人为源成分谱基础上,结合环境空气加强观测实验,应用 CMB 8.0 模型对该地区大气中的 NMHCs (C2 ~ C9) 来源进行解析,探

讨各人为源的贡献特征,旨在弄清楚它们的人为来源和各污染源的贡献率.

## 2 样品采集及分析 (Sample collection and analysis)

### 2.1 污染源样品和环境空气样品的采集方法

本次研究在广州地区采集了流动源、面源和工业点源 3 大类共 13 种典型人为排放源样品,其中流动源包括汽油车、柴油车和液化石油气车 3 种;面源包括加油站、工业垃圾焚烧、炼焦工艺、喷漆加工、油墨工艺、电子加工厂、制冷工艺和卷烟加工厂 11 种;工业点源包括乙烯石化厂和石油加工 2 种. 采用微电脑自动采样器(武汉天虹 TH-16A)采集工业点源烟气,采用无油单极泵采集机动车尾气和面源(包括垃圾焚烧和工业面源)样品. 使用经过钝化处理的不锈钢采样罐(6L)收集和保存样品,其采样流量为  $1.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ . 采样罐技术能够确保气体样品中 NMHCs 成分的完整性,而且在常温条件下空气样品的有效保存期可达到 30d. 采样时同步监测废气排放的流量、温度、相对湿度和大气压. 本次共采集污染源样品 169 个,各种污染源样品数量分别为:汽车 18 个、加油站 12 个、工业垃圾焚烧 20 个、炼焦工艺 16 个、喷漆加工 20 个、油墨工艺 16 个、电子加工厂 24 个、制冷工艺 18 个和卷烟加工厂 25 个.

如图 1 所示,在采集环境空气样品时沿广州地

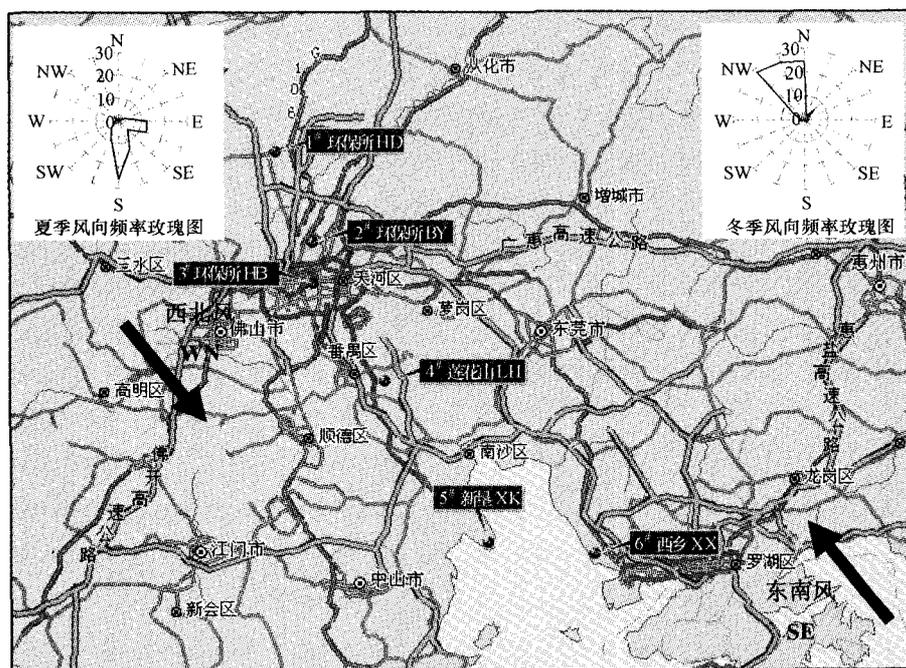


图 1 广州地区环境空气采样点位布设

Fig. 1 Locality of the ambient air sampling sites in Guangzhou

区地面主导风向上布设 6 个观测点,其中 3<sup>#</sup>环保所位于市区,其它点位于城郊,郊区测点作为市区夏季或冬季的下风向受体点. 该地区夏季主导风为东南风,大致为西乡→新垦→莲花山→环保所→白云山→花都;冬季主导风为西北风,与夏季正好相反. 采样时间选择夏季(2002 年 7 月 24 日至 27 日)和冬季(2002 年 11 月 6 日至 10 日),可代表该地区典型气象条件. 采用采样罐收集环境空气样品. 各点按每天 6:00~9:00、9:00~12:00、12:00~15:00 和 15:00~18:00 共 4 个时段同步采集样品. 环境空气样品采集数量为 250 个.

## 2.2 分析方法与条件

所有样品均采用 7100 型预浓缩仪(美国 Entech 公司生产)进行脱水-除 CO<sub>2</sub>-聚焦三级自动前处理,然后应用气相色谱-质谱联用仪器(HP5890 GC/5972MSD)进行定性和定量分析(王伯光等,2004).

气相色谱采用 HP-5(PH ME, 胶联质量浓度为 5% 的苯基甲基硅烷)规格为 60m × 0.32mm × 1.0μm 的毛细管色谱柱. 柱流量恒定为 0.85 mL·min<sup>-1</sup>,质谱电子能量为 70eV,电子倍增器电压为 2118V. GC-MS 接口温度为 280℃. 分析过程中使用高纯氦气、液氮和高纯水等化学试剂,以及美国 SG 公司生产的 52 种 NMHCs(C2~C9)混合标准气体和 4 种内标化合物(单个化合物浓度 100 μg·m<sup>-3</sup>).

## 2.3 质量控制与保证

空白样品的检出浓度 ≤ 0.003 μg·m<sup>-3</sup>,最低方法检出限为 0.003 μg·m<sup>-3</sup>,样品精度(重复性)RSD ≤ 20%,回收率为 85%~115%. 空白样品和平行样品数量占总样品数量的 15%.

## 2.4 模型运行

### 2.4.1 模型基本原理及输入输出参数

化学质量平衡受体模型是通过分析排放源和受体点的化学组分浓度,建立一系列的质量平衡方程,通过多元回归分析求解方程,以确定每类源对受体点样品的贡献是多少. 模型的基本原理为:

$$C_i = \sum_{j=1}^J F_{ij} \cdot S_j \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (1)$$

式中,  $C_i$  是在受体点测得的组分  $i$  的环境大气浓度;  $J$  是源的数目;  $F_{ij}$  是  $j$  排放源所排出的  $i$  组分的浓度(源成分谱);  $S_j$  是源  $j$  对受体的总贡献. 选定拟合

组分和拟合源,当拟合组分的数目  $I$  大于或等于拟合源的数目  $J$  时,可以解出此线性方程组,得到各个排放源对该受体点的贡献值  $S_j$  和相应的源贡献率. 模型的输入数据包括排放源各化学组分的质量分数、受体点中各化学组分的浓度以及排放源和受体点中各组分测定的不确定值. 本研究中不确定值的估算方法参照文献方法(Fujita *et al.*, 1994; 王伯光等, 2002; 陆思华等, 2006). 对于受体点数据,各组分不确定值估算公式为:

$$\sigma(c) = ( (2 \times \text{MDL})^2 + (\text{CV} \times C)^2 )^{1/2} \quad (2)$$

式中, MDL 为采用 GC-MS 方法进行分析时各组分的最低检测限, CV 为变异系数,  $C$  为测得的各组分的浓度.

对于源成分谱的数据,输入模型的源成分谱数据是 52 种 NMHCs(C2~C9)化学组分进行归一化后的结果. 对于质量分数超过 0.1% 的组分,不确定值为多次测定的实际偏差,而对于质量分数低于 0.1% 的组分,可采用下式进行估算:

$$\sigma = (\text{MDL}^2 + (\text{CV} \times w)^2)^{1/2} \quad (3)$$

式中,  $w$  为源成分谱中各组分的质量分数. 模型的输出结果包括排放源对受体点的贡献值、相应的源贡献率以及验证模型输出结果有效性的几个诊断参数,这些参数主要有拟合方程的回归系数( $R^2$ )、残差平方和( $\text{Chi}^2$ )和百分质量(PercentMass)等,参数的理想范围应分别为 0.8~1.0、0~4.0 和 80%~120%.

### 2.4.2 源成分谱及拟合组分选取

选用前面 6 个观测点在夏季加强观测和冬季加强观测获得的环境数据进行模型试运行,本次研究的 13 种源成分谱均参与计算. 通过对 52 种 NMHCs(C2~C9)组分进行拟合计算和筛选,最终选取了 27 种组分参与模型运算,它们的计算值与实际测量浓度的误差率 ≤ 20% (见表 1). 一般选择大于或近似甲苯寿命的组分以及在大气中含量较为丰富、具有明确指纹意义的源排放特征化合物作为优先选取的拟合组分,例如尽量不选化学活性强的烯烃为拟合组分,但大气中含量丰富的乙烯除外.

表 1 模型计算选取的拟合组分

Table 1 Regression components used in the CMB modeling calculation

化合物	误差率	化合物	误差率	化合物	误差率
乙炔	8.1%	异戊烷	12.2%	苯	7.5%
乙烯	0.7%	2,2-二甲基丁烷	20.0%	甲苯	2.4%
1-戊烯	8.2%	环戊烷	18.0%	乙基苯	20.0%
4-甲基-1-戊烯	0.3%	2-甲基戊烷	19.8%	间/对-二甲苯	7.9%
1-丁烯	9.2%	3-甲基戊烷	20.0%	邻-二甲苯	11.6%
乙烷	8.5%	正己烷	20.0%	正丙基苯	13.5%
丙烷	20.0%	甲基环戊烷	20.0%	对-乙基甲苯	15.5%
异丁烷	15.9%	2,4-二甲基戊烷	2.1%	1,3,5-三甲基苯	15.9%
正丁烷	10.1%	正辛烷	18.2%	1,2,4-三甲基苯	12.7%

### 3 结果 (Results)

#### 3.1 人为源的 NMHCs 成分谱

为了消除因生产规模、工况和测试条件等因素对污染物排放浓度结果的影响,合理地反映出各污

染源与生产原材料、生产工艺和排放过程相关的指纹特征,本研究中对各人为源的监测结果进行无量纲化和归一化,得到各化学组分占其 NMHCs (C2 ~ C9) 排放总质量浓度的百分比权重,即源成分谱 (表 2)。

表 2 广州地区典型 NMHCs (C2 ~ C9) 人为源成分谱

Table 2 Typical compositional profiles of NMHCs (C2 ~ C9) from anthropogenic sources in Guangzhou

化合物	汽油车尾气 质量分数	柴油车尾气 质量分数	液化石油气车 尾气质量分数	乙烯石化厂 质量分数	石油加工 质量分数	加油站 质量分数	工业垃圾焚烧 质量分数
乙烷	4.44% ± 14.9%	0 ± 0	3.39% ± 4.49%	2.05% ± 0.28%	37.85% ± 2.17%	0.24% ± 1.03%	4.11% ± 9.62%
乙烯	0.65% ± 1.39%	0.29% ± 0.21%	24.90% ± 25.90%	17.61% ± 1.02%	0 ± 0.43%	0 ± 0.29%	0 ± 68.11%
乙炔	4.21% ± 0.03%	4.02% ± 4.47%	6.41% ± 11.40%	0 ± 0.02%	0 ± 0.12%	0 ± 0.02%	3.09% ± 7.25%
1-丁烯	1.87% ± 2.86%	1.04% ± 0.75%	0.70% ± 0.46%	1.08% ± 0.08%	0.36% ± 0.69%	0.39% ± 0.40%	0.17% ± 0.16%
异丁烯	0 ± 0	0 ± 0	17.10% ± 8.47%	0 ± 0.01%	0 ± 0.04%	0 ± 0.02%	0 ± 0.40%
丙烯	1.49% ± 2.18%	1.38% ± 1.09%	7.09% ± 10.21%	0.55% ± 0.06%	0.39% ± 0.06%	0.15% ± 0.02%	0 ± 0.40%
丙烷	0 ± 0.02%	0 ± 0	19.10% ± 30.90%	0.77% ± 0	1.40% ± 0.16%	0.55% ± 0.02%	0 ± 0
异丁烷	0.22% ± 0.10%	0.32% ± 0.27%	0.36% ± 0.04%	0 ± 0.13%	0 ± 2.55%	0 ± 0.54%	0 ± 0
正丁烷	0.36% ± 0.27%	0.69% ± 0.60%	18.90% ± 6.88%	1.09% ± 0.18%	0.87% ± 1.58%	0.54% ± 0.54%	0.63% ± 0.47%
反-2-丁烯	0.44% ± 0.14%	0.50% ± 0.42%	0.78% ± 0.52%	0.63% ± 0.03%	0.75% ± 0.87%	0.14% ± 0.15%	1.37% ± 0.34%
顺-2-丁烯	0.34% ± 0.05%	0.40% ± 0.35%	1.13% ± 0.47%	0.48% ± 0.05%	0.32% ± 0.94%	0.12% ± 0.13%	2.14% ± 0.30%
异戊烷	5.63% ± 6.90%	9.25% ± 8.92%	0.41% ± 0.26%	1.56% ± 0.06%	0.51% ± 0.66%	1.18% ± 1.21%	0.80% ± 0.38%
1-戊烯	0.65% ± 0.47%	1.12% ± 0.91%	0 ± 0	2.24% ± 0.06%	0.10% ± 0.16%	0.68% ± 1.20%	2.14% ± 0.24%
正戊烷	1.90% ± 1.24%	3.49% ± 2.90%	0.15% ± 0.02%	3.62% ± 0.39%	0.62% ± 0.46%	0.90% ± 1.03%	7.43% ± 0.91%
异戊二烯	0.56% ± 0.99%	0 ± 0	0 ± 0	0.32% ± 0.08%	0.07% ± 0.11%	0.19% ± 0.15%	2.86% ± 0.40%
反-2-戊烯	2.16% ± 2.35%	3.11% ± 3.03%	0 ± 0	0.43% ± 0.04%	0.10% ± 0.16%	0.57% ± 0.82%	0.68% ± 0.09%
2-甲基-2-丁烯	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0.50%	0 ± 0.29%	1.09% ± 1.32%	0.01% ± 0.01%
2,2-二甲基丁烷	0.32% ± 0.11%	0.50% ± 0.40%	0 ± 0	0.12% ± 0.16%	0.14% ± 0.05%	0.02% ± 0.03%	11.13% ± 1.50%
顺-2-戊烯	0.46% ± 0.07%	1.01% ± 0.87%	0 ± 0	0.13% ± 0.04%	0.03% ± 0.17%	0.30% ± 0.72%	0 ± 0.09%
4-甲基-1-戊烯	0.82% ± 1.90%	0 ± 0	0 ± 0	0.30% ± 0.01%	0.52% ± 0.13%	0.24% ± 0.30%	0.09% ± 0.04%
环戊烷	0.24% ± 0.22%	0.59% ± 0.41%	0 ± 0	0 ± 0.01%	0 ± 0.38%	0 ± 0.47%	0 ± 0
2,3-二甲基丁烷	1.05% ± 1.12%	1.96% ± 1.57%	0 ± 0	0.14% ± 0.01%	0.11% ± 0.53%	1.15% ± 1.56%	0.58% ± 0.22%
2-甲基戊烷	3.77% ± 5.49%	5.38% ± 6.01%	0 ± 0	0.81% ± 0.27%	0.79% ± 0.42%	12.10% ± 17.20%	0.78% ± 0.30%
3-甲基戊烷	3.06% ± 2.97%	3.75% ± 5.18%	0 ± 0	0.17% ± 0.04%	1.15% ± 0.31%	0.48% ± 0.23%	1.50% ± 0.43%
正己烷	0.68% ± 2.30%	2.93% ± 3.83%	0 ± 0	1.07% ± 1.77%	0.57% ± 0.69%	2.07% ± 1.31%	3.82% ± 0.40%

续表 2

化合物	汽油车尾气 质量分数	柴油车尾气 质量分数	液化石油气车 尾气质量分数	乙烯石化厂 质量分数	石油加工 质量分数	加油站 质量分数	工业垃圾焚烧 质量分数
1-己烯	0.26% ± 0.43%	1.87% ± 1.52%	0 ± 0	0.31% ± 4.58%	0.09% ± 11.17%	0.26% ± 0.57%	0.93% ± 0.27%
顺-2-己烯	0.01% ± 0.05%	0 ± 0	0 ± 0	0.33% ± 1.54%	0.02% ± 0.05%	0.04% ± 0.04%	0.93% ± 0.27%
甲基环戊烷	4.96% ± 2.93%	5.19% ± 7.10%	0 ± 0	0.48% ± 0.44%	0.35% ± 0.44%	0.33% ± 0.11%	2.55% ± 0.25%
2,4-二甲基戊烷	0.20% ± 0.07%	0.44% ± 0.27%	0 ± 0	9.95% ± 5.74%	0.07% ± 0.11%	0 ± 0.03%	6.57% ± 1.17%
苯	4.65% ± 1.77%	4.82% ± 3.80%	0 ± 0	4.74% ± 2.28%	1.00% ± 1.22%	27.20% ± 37.40%	3.84% ± 0.42%
环己烷	0.35% ± 0.36%	0.50% ± 0.30%	0 ± 0	0.48% ± 0.44%	0.17% ± 0.21%	0.21% ± 0.09%	0.87% ± 0.27%
2-甲基己烷	2.56% ± 2.89%	3.17% ± 4.22%	0 ± 0	2.87% ± 26.95%	0 ± 15.36%	2.30% ± 1.50%	1.86% ± 0.23%
2,3-二甲基戊烷	0.92% ± 0.21%	1.33% ± 1.04%	0 ± 0	8.12% ± 3.97%	4.07% ± 5.85%	0.30% ± 0.07%	0.31% ± 0.12%
3-甲基己烷	2.73% ± 1.93%	3.85% ± 3.31%	0 ± 0	1.43% ± 7.01%	1.22% ± 0.84%	1.12% ± 0.47%	0 ± 0
2,2,4-三甲基戊烷	0.03% ± 0.02%	0 ± 0	0 ± 0	0.19% ± 1.20%	0.95% ± 1.03%	0.18% ± 0.05%	0.16% ± 0.04%
正庚烷	1.79% ± 1.03%	2.31% ± 1.87%	0 ± 0	0.37% ± 3.76%	1.08% ± 0.78%	1.12% ± 0.58%	1.16% ± 0.14%
甲基环己烷	1.60% ± 1.17%	2.09% ± 1.68%	0 ± 0	0.96% ± 0.30%	0.47% ± 0.55%	0.40% ± 0.15%	0.12% ± 0.04%
2,3,4-三甲基戊烷	0.01% ± 0.02%	0 ± 0	0 ± 0	3.00% ± 0.32%	0.21% ± 0.14%	0.31% ± 0.14%	0.30% ± 0.04%
甲苯	9.36% ± 8.75%	11.90% ± 10.20%	0 ± 0	15.20% ± 32.60%	11.90% ± 14.00%	24.90% ± 15.80%	16.2% ± 2.26%
2-甲基庚烷	1.46% ± 0.84%	2.07% ± 1.58%	0 ± 0	0.30% ± 1.43%	0.63% ± 0.47%	0.40% ± 0.13%	0.55% ± 0.09%
3-甲基庚烷	4.17% ± 6.93%	2.68% ± 2.10%	0 ± 0	1.21% ± 1.32%	11.70% ± 15.50%	2.61% ± 2.49%	0.47% ± 0.08%
正辛烷	1.14% ± 0.67%	1.54% ± 1.15%	0 ± 0	4.86% ± 0.54%	2.55% ± 3.23%	1.48% ± 0.46%	0.33% ± 0.04%
乙基苯	2.30% ± 1.75%	2.32% ± 1.98%	0 ± 0	3.64% ± 0.12%	2.96% ± 2.72%	6.22% ± 4.97%	3.38% ± 0.30%
间/对-二甲苯	10.6% ± 5.74%	7.51% ± 4.74%	0 ± 0	2.80% ± 0.04%	2.68% ± 2.47%	3.22% ± 2.03%	2.91% ± 0.30%
苯乙烯	1.03% ± 2.78%	0 ± 0	0 ± 0	0.27% ± 0.01%	1.19% ± 1.09%	0.65% ± 0.18%	1.14% ± 1.38%
邻-二甲苯	3.90% ± 1.67%	2.66% ± 1.71%	0 ± 0	1.73% ± 0.04%	2.22% ± 2.01%	1.95% ± 0.84%	5.15% ± 0.10%
壬烷	0.82% ± 0.14%	0.85% ± 0.21%	0 ± 0	0.29% ± 0.02%	0.72% ± 0.61%	0.23% ± 0.10%	2.85% ± 0.51%
异丙基苯	0.34% ± 0.26%	0 ± 0	0 ± 0	0.20% ± 0	0.15% ± 0.15%	0.04% ± 0.02%	0.35% ± 0.04%
正丙基苯	0.99% ± 0.88%	0.62% ± 0.50%	0 ± 0	0.11% ± 0.01%	0.30% ± 0.26%	0.48% ± 0.24%	0.62% ± 0.08%
1,3,5-三甲基苯	0.99% ± 0.77%	0.69% ± 0.46%	0 ± 0	0.13% ± 0.02%	0.83% ± 0.72%	0.29% ± 0.10%	1.20% ± 0.09%
1,2,4-三甲基苯	5.82% ± 7.75%	4.29% ± 8.06%	0 ± 0	0.38% ± 0.03%	6.29% ± 5.30%	0.75% ± 0.83%	2.14% ± 0.15%

化合物	炼焦工艺 质量分数	喷漆加工 质量分数	油墨工艺 质量分数	电子加工厂 质量分数	制冷工艺 质量分数	卷烟加工厂 质量分数
乙烷	0.15% ± 0.03%	0 ± 0	0 ± 0	2.16% ± 2.34%	0.04% ± 0.71%	0.71% ± 21.14%
乙烯	0 ± 0.10%	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 1.68%	0 ± 0
乙炔	0 ± 0.01%	0 ± 0	0 ± 0	1.64% ± 1.76%	0 ± 0	0.54% ± 21.06%
1-丁烯	0.30% ± 0.13%	0 ± 0	0 ± 0	5.03% ± 5.43%	0.67% ± 1.68%	0.10% ± 0.93%
异丁烯	0 ± 0.01%	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
丙烯	0.04% ± 0.01%	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0.37% ± 0	0 ± 0
丙烷	0 ± 0.01%	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
异丁烷	0.49% ± 0.39%	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	1.75% ± 1.49%	0.04% ± 0.70%
正丁烷	0.43% ± 0.40%	0 ± 0	0 ± 0.21%	0 ± 0.01%	0.87% ± 2.92%	0.26% ± 2.48%
反-2-丁烯	0.13% ± 0.04%	0 ± 0	0.03% ± 0.02%	1.65% ± 1.78%	0.22% ± 0.83%	0.03% ± 0
顺-2-丁烯	0.06% ± 0.12%	0 ± 0	0.03% ± 0.02%	1.50% ± 1.62%	0.09% ± 0.89%	0 ± 0
异戊烷	0.33% ± 0.12%	0.81% ± 2.08%	0 ± 0.07%	0.12% ± 0.02%	0.96% ± 1.99%	0.13% ± 0.54%
1-戊烯	0.06% ± 0.10%	0.27% ± 0.69%	0 ± 0.03%	0.05% ± 0.04%	0 ± 0	0.52% ± 15.00%
正戊烷	0.26% ± 0.07%	0 ± 0	0 ± 0	0.63% ± 0.64%	0.66% ± 1.75%	0.22% ± 0
异戊二烯	0.11% ± 0.08%	0 ± 0	0.15% ± 3.44%	0.91% ± 0.17%	0.12% ± 0.32%	0.34% ± 1.12%
反-2-戊烯	0.10% ± 0.04%	0 ± 0	0 ± 0	0.11% ± 0.09%	0.31% ± 0.92%	0.03% ± 0.19%
2-甲基-2-丁烯	0 ± 0.25%	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0.37% ± 1.01%	0 ± 0
2,2-二甲基丁烷	0.09% ± 0	24.70% ± 18.80%	1.98% ± 22.4%	41.90% ± 42.10%	0.13% ± 0.17%	43.10% ± 3.49%

续表 2

化合物	炼焦工艺 质量分数	喷漆加工 质量分数	油墨工艺 质量分数	电子加工厂 质量分数	制冷工艺 质量分数	卷烟加工厂 质量分数
顺-2-戊烯	0.03% ± 0.09%	0 ± 0	0 ± 0	0.33% ± 0.35%	0.06% ± 0.35%	0 ± 0.19%
4-甲基-1-戊烯	0 ± 0.08%	27.40% ± 24.10%	0 ± 0.87%	14.30% ± 12.60%	0.58% ± 0.14%	0.03% ± 5.18%
环戊烷	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0.02%	0.14% ± 0.15%	0 ± 1.14%	0 ± 0
2,3-二甲基丁烷	0.14% ± 0.89%	0 ± 0	0 ± 0.05%	1.24% ± 1.34%	0.14% ± 0.59%	0.06% ± 0.26%
2-甲基戊烷	1.03% ± 1.34%	0 ± 0	0 ± 0.05%	1.68% ± 1.82%	1.54% ± 0.78%	0.09% ± 0.35%
3-甲基戊烷	1.45% ± 1.01%	0.97% ± 2.50%	0 ± 0.09%	0 ± 0.01%	0.66% ± 0.60%	0.04% ± 0
正己烷	7.05% ± 7.39%	1.29% ± 3.33%	5.47% ± 2.58%	6.89% ± 7.39%	36.93% ± 0.78%	0.07% ± 2.62%
1-己烯	0.49% ± 0	0 ± 0	0.74% ± 0.33%	0.74% ± 0.79%	0.88% ± 0	0.12% ± 0.29%
顺-2-己烯	0.03% ± 0.03%	0 ± 0	0.74% ± 0.33%	0.74% ± 0.79%	0.10% ± 0.14%	0.12% ± 0.29%
甲基环戊烷	2.13% ± 2.24%	0.65% ± 1.67%	0.32% ± 0.14%	0.16% ± 0.18%	0.04% ± 0.59%	0.04% ± 0.10%
2,4-二甲基戊烷	2.38% ± 2.51%	13.30% ± 10.30%	26.4% ± 18.1%	3.98% ± 4.21%	0.60% ± 0.39%	51.70% ± 4.70%
苯	1.26% ± 0.17%	1.94% ± 5.00%	0.28% ± 0.16%	1.19% ± 1.26%	2.39% ± 5.04%	0.13% ± 0.42%
环己烷	1.48% ± 1.46%	0 ± 0	0.18% ± 0.62%	0.12% ± 0.12%	0.16% ± 0.29%	0.02% ± 0.00%
2-甲基己烷	0 ± 21.39%	0.86% ± 2.22%	2.39% ± 0.06%	0.22% ± 0.24%	3.17% ± 2.17%	0.02% ± 0.26%
2,3-二甲基戊烷	6.91% ± 6.92%	0 ± 0	0 ± 0	0.20% ± 0.21%	1.06% ± 0.37%	0.03% ± 0.33%
3-甲基己烷	25.1% ± 25.3%	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	2.62% ± 1.11%	0 ± 0
2,2,4-三甲基戊烷	3.10% ± 2.66%	0 ± 0	0.18% ± 0.18%	0.01% ± 0.01%	0.42% ± 0.07%	0.01% ± 0.00%
正庚烷	15.10% ± 14.80%	0.38% ± 0.97%	0.43% ± 0.04%	0.16% ± 0.03%	2.03% ± 0.63%	0 ± 0.26%
甲基环己烷	3.04% ± 2.73%	0 ± 0	5.04% ± 0.05%	0 ± 0	0.81% ± 0.46%	0.10% ± 0.10%
2,3,4-三甲基戊烷	0.53% ± 0.43%	2.15% ± 5.55%	0.12% ± 9.27%	0.30% ± 0.32%	0.40% ± 0.66%	0.19% ± 6.09%
甲苯	12.90% ± 1.23%	11.63% ± 1.10%	0.80% ± 16.60%	6.14% ± 6.41%	21.60% ± 42.10%	0.82% ± 2.93%
2-甲基庚烷	2.28% ± 1.76%	2.15% ± 5.55%	0.18% ± 12.10%	0.37% ± 0.40%	0.73% ± 0.65%	0.24% ± 7.79%
3-甲基庚烷	2.85% ± 2.37%	2.58% ± 6.66%	0 ± 11.12%	0.15% ± 0.16%	0.80% ± 0.69%	0.01% ± 0.17%
正辛烷	2.33% ± 0.18%	0 ± 0	0 ± 0.09%	0.08% ± 0.07%	8.74% ± 15.55%	0 ± 0.19%
乙基苯	1.50% ± 0.22%	1.93% ± 0.53%	10.17% ± 0.30%	0.77% ± 0.79%	1.37% ± 1.81%	0.11% ± 0.10%
间/对-二甲苯	1.13% ± 0.14%	1.93% ± 0.53%	9.99% ± 0.29%	0.77% ± 0.79%	1.06% ± 1.46%	0.11% ± 0.10%
苯乙烯	0.56% ± 0.06%	0.43% ± 1.11%	1.16% ± 0.04%	2.77% ± 3.00%	0.75% ± 0.26%	0.01% ± 0
邻-二甲苯	1.04% ± 0.14%	4.06% ± 6.03%	32.12% ± 0.25%	0.32% ± 0.31%	0.97% ± 1.45%	0.07% ± 0.10%
壬烷	0.39% ± 0.03%	0 ± 0	0.07% ± 0	0.14% ± 0.04%	0.79% ± 1.52%	0.01% ± 0.26%
异丙基苯	0.05% ± 0	0 ± 0	0.97% ± 0.02%	0.08% ± 0.09%	0.11% ± 0	0 ± 0
正丙基苯	0.68% ± 0.46%	0 ± 0	0 ± 0	0.01% ± 0.01%	0.18% ± 0.06%	0.02% ± 0.10%
1,3,5-三甲基苯	0.24% ± 0.01%	0 ± 0	0 ± 0.04%	0.09% ± 0.08%	0.50% ± 0.78%	0.03% ± 0.10%
1,2,4-三甲基苯	0.70% ± 0.11%	0.48% ± 1.25%	0.07% ± 0.04%	0.11% ± 0.07%	1.28% ± 1.07%	0.04% ± 0.10%

### 3.2 广州地区环境空气中 NMHCs 的污染状况分析

广州大气中 NMHCs 的污染程度较为严重,其组成及含量具有较明显的时空分布规律,不同化合物的时空分布特征差异性较大(王伯光等,2004;陆思华等,2006;Steven,2007)。从夏季和冬季 2 季观

测得到的平均统计结果可知,该地区大气环境 NMHCs 平均质量浓度高达  $455.95 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 各类化合物占 NMHCs 总质量的百分比分别为:乙炔占 1.4%, 烷烃占 27.6%, 烯烃占 51.8%, 芳香烃占 19.1%。在烯烃中乙烯占 87% (表 3)。

表 3 2002 年广州地区环境空气中的 NMHC (C2~C9) 平均浓度

Table 3 Mean concentrations of NMHCs (C2~C9) in the atmosphere of Guangzhou in 2002

 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 

化合物名称	浓度	化合物名称	浓度	化合物名称	浓度
乙炔	6.43 ± 14.77	异丁烷	2.66 ± 6.44	甲基-环己烷	2.78 ± 10.59
乙烯	205.65 ± 435.41	丁烷	3.78 ± 6.51	2,3,4-三甲基戊烷	3.55 ± 12.38
丙烯	1.66 ± 4.93	异戊烷	4.19 ± 8.88	2-甲基-庚烷	3.23 ± 12.19
1-丁烯	2.28 ± 6.21	戊烷	2.05 ± 8.23	3-甲基-庚烷	3.55 ± 12.50
1,3-二丁烯	1.88 ± 6.00	2,2-二甲基丁烷	2.07 ± 9.14	辛烷	7.31 ± 14.26
反-2-丁烯	1.51 ± 6.08	2,3-二甲基丁烷	3.81 ± 9.69	壬烷	3.61 ± 13.69

续表3  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 

化合物名称	浓度	化合物名称	浓度	化合物名称	浓度
顺-2-丁烯	1.48 ± 6.09	2-甲基-戊烷	4.52 ± 9.85	苯	8.87 ± 11.45
2-甲基-2-丁烯	1.62 ± 7.31	环戊烷	2.47 ± 7.75	甲苯	40.33 ± 56.81
1-戊烯	3.40 ± 7.89	3-甲基-戊烷	2.98 ± 9.49	乙苯	7.32 ± 12.47
异戊二烯	3.05 ± 7.46	己烷	3.72 ± 9.84	邻、对位二甲苯	6.18 ± 12.25
3-甲基-1-丁烯	1.93 ± 7.60	2,4-二甲基-戊烷	9.28 ± 14.19	苯乙烯	3.65 ± 11.42
反-2-戊烯	1.90 ± 7.60	甲基-环戊烷	3.71 ± 10.41	间-二甲苯	4.64 ± 11.59
4-甲基-1-戊烯	4.43 ± 9.69	2-甲基-己烷	5.28 ± 11.53	异丙基-苯	3.01 ± 12.79
环戊烯	1.55 ± 7.28	环己烷	22.32 ± 19.84	丙基-苯	3.15 ± 12.84
反-2-己烯	1.97 ± 9.05	2,3-二甲基-戊烷	4.53 ± 11.83	1,3,5-三甲基苯	4.16 ± 13.60
顺-2-己烯	1.97 ± 9.05	3-甲基-己烷	2.77 ± 11.43	1,2,4-三甲基苯	5.88 ± 19.65
乙烷	9.61 ± 22.49	2,2,4-三甲基戊烷	4.69 ± 12.12	合计	455.95
丙烷	2.32 ± 5.37	庚烷	5.26 ± 11.10		

从夏、冬2季观测数据的比较分析可知,夏季环境空气中的NMHCs平均浓度为 $504.85\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其中乙炔为 $10.35\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、烷烃为 $149.55\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、烯烃占 $231.13\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、芳香烃占 $113.82\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。冬季环境空气中的NMHCs平均浓度为 $407.04\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其中乙炔为 $8.86\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、烷烃为 $92.71\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、烯烃占 $259.38\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、芳香烃占 $46.09\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。因此,广州地区夏季环境空气中的NMHCs污染情况较冬季要严重。值得注意的是,夏季芳香烃化合物占NMHCs的22.5%,而冬季只占11.3%。在大气光化学反应过程中芳香烃化合物容易向气溶胶细粒子污染产物转化,形成灰霾等大气污染物,反映出广州地区冬季具有比夏季更强的光化学反应特征,比较符合当前珠江三角洲大气污染实际状况(Wu *et al.*, 2005)。

从各受体点的比较分析可知,夏季各点的NMHCs平均浓度依次为:西乡( $441.00\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、新垦( $1001.85\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、莲花山( $329.75\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、环保所( $659.48\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、白云山( $425.04\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )和花都( $172.06\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ );冬季各点依次为:西乡( $399.95\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、新垦( $358.34\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、莲花山( $207.47\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、环保所( $586.34\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、白云山( $562.01\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )和花都( $328.20\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )。由此可见,广州地区大气NMHCs平均浓度呈现出受主导风向影响的空间分布规律,其中广州市区始终为NMHCs高浓度区,而新垦测点和白云山测点因受高浓度乙烯的影响分别在夏季和冬季成为高浓度区。

### 3.3 源解析结果

将所选取13种人为源源成分谱和27种拟合组分运用到CMB模型中,对所测定的6个受体点环境

数据进行解析。各点的模型输出参数值分别为(Percent Mass):83.5%~110.0%,平均为98.6%; $R^2$ 值:0.80~0.98,平均为0.93; $\text{Chi}^2$ 为0.65~2.00,平均为2.77,说明输出结果符合模型诊断参数的要求,拟合结果较好,能够反映污染源对受体点大气贡献的实际情况。通过模型解析,获得了如下所述广州地区人为源NMHCs(C2~C9)的平均浓度贡献、各受体点在夏季和冬季的浓度贡献率。

3.3.1 广州地区人为源NMHCs(C2~C9)的平均浓度贡献 从人为源排放对广州地区的平均贡献率分析,工业排放(包括点源和面源)是该地区最重要的NMHCs污染源,其浓度贡献率占环境平均浓度的75.8%,这与其种类多、数量大、超负荷生产、普遍废气治理技术较差或甚至无任何治理措施等因素密切相关(表4)。从具体人为源分析,机动车排放和乙烯化工厂为最主要的污染源,其浓度贡献率约占53.9%,其次为加油站、石油加工和电子加工业等污染源,其浓度贡献量约占29.4%。乙烯化工工业点源和流动源已成为该地区NMHCs人为源的控制重点,而面源却是控制的难点。从夏季和冬季2季加强观测的比对分析可知,机动车、加油站和一些具有较大挥发性的污染源的浓度贡献率夏季明显较冬季高,而与生产负荷相关的工业点源的浓度贡献率冬季均较夏季高。例如,加油站在夏季的浓度贡献值为 $104.81\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,贡献率为17.8%,而其在冬季则分别为 $17.85\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,贡献率为4.3%;乙烯化工厂在夏季的浓度贡献值为 $139.45\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,贡献率为23.6%,而其在冬季则分别为 $162.49\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,贡献率为39.6%。

表 4 广州地区各类人为源对环境空气中 NMHCs 的平均浓度贡献和贡献率

Table 4 Contributions of anthropogenic sources to the average concentrations of NMHCs in the atmosphere of Guangzhou

污染源类型	污染源名称	二次加强观测平均		2002 年 7 月 24 ~ 27 日		2002 年 11 月 06 ~ 10 日	
		浓度 /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	贡献率	浓度 /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	贡献率	浓度 /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	贡献率
流动源	机动车(包括 GSL,DSL 和 LPG)	122.88	24.2%	151.93	25.8%	93.82	22.9%
面源	加油站	61.33	12.1%	104.81	17.8%	17.85	4.3%
	涂料	21.74	4.3%	25.40	4.3%	18.07	4.4%
	工业垃圾焚烧	12.35	2.4%	13.13	2.2%	11.57	2.8%
	电子加工	42.22	8.3%	47.54	8.1%	36.89	9.0%
	油墨	5.41	1.1%	3.06	0.5%	7.76	1.9%
	卷烟加工	4.50	0.9%	7.98	1.4%	1.01	0.2%
	制冷工艺	3.66	0.7%	5.20	0.9%	2.11	0.5%
	炼焦	9.58	1.9%	5.32	0.9%	13.83	3.4%
	小计	160.77	31.6%	212.45	36.0%	109.09	26.6%
点源	乙烯化工厂	150.97	29.7%	139.45	23.6%	162.49	39.6%
	石油加工	45.54	9.0%	54.83	9.3%	36.24	8.8%
	小计	196.51	38.6%	194.27	32.9%	198.73	48.4%
未知源	未知源	28.31	5.6%	31.21	5.3%	25.41	6.2%
合计		508.46	100%	589.86	100%	427.05	100%

3.3.2 夏季和冬季受体点人为源 NMHCs (C2 ~ C9) 的浓度贡献特征 各受体点的人为源贡献率主要受局地污染源和上风向污染源的影响,表现出一定的空间分布特征(见图 2 和图 3)。

机动车在夏季和冬季对各受体点的浓度贡献率相对稳定,为市区及其周边环境空气中的主要人为源.夏季,沿东南风主导风向从西乡→新垦→莲花山→环保所(广州市区)→白云山→花都,各受体点机动车的浓度贡献率分别为 26%、12%、31%、39%、36% 和 24% ;冬季沿西北风主导风向从花都

→白云山→环保所(广州市区)→莲花山→新垦→西乡,各受体点的机动车浓度贡献率依次为 16%、18%、44%、35%、9% 和 8%。

工业点源对各受体点的浓度贡献率均较高,为广州地区的主要人为源.夏季各受体点的工业点源(包括乙烯化工厂和石油加工)浓度贡献率均值为 28%,变化范围为 19% ~ 49%;冬季浓度贡献率均值为 47%,变化范围为 34% ~ 67%。冬季污染程度普遍较夏季更为严重。

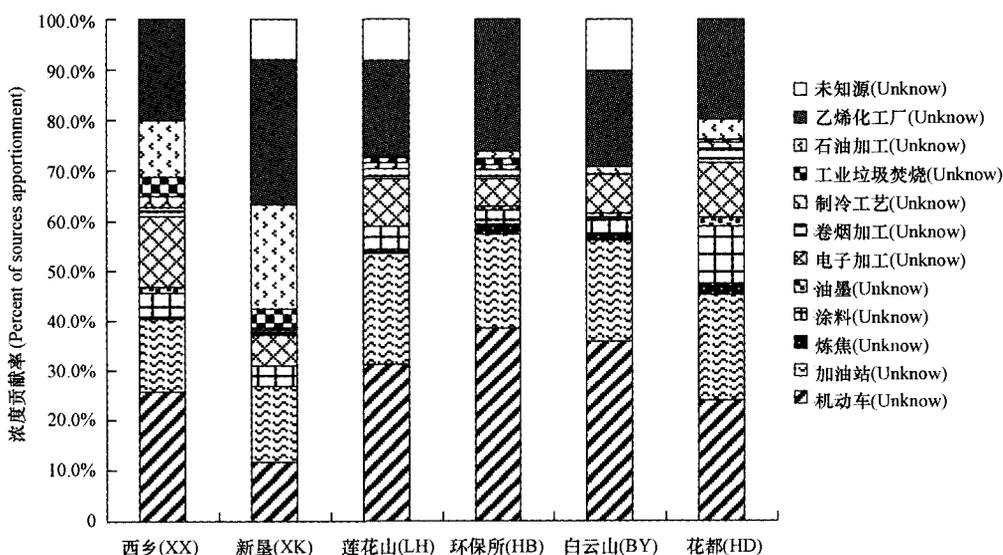


图 2 2002 年夏季沿主导风向各受体点 NMHCs 人为源的浓度贡献率

Fig. 2 Contributions of anthropogenic sources to NMHCs in the sampling sites in Summer 2002

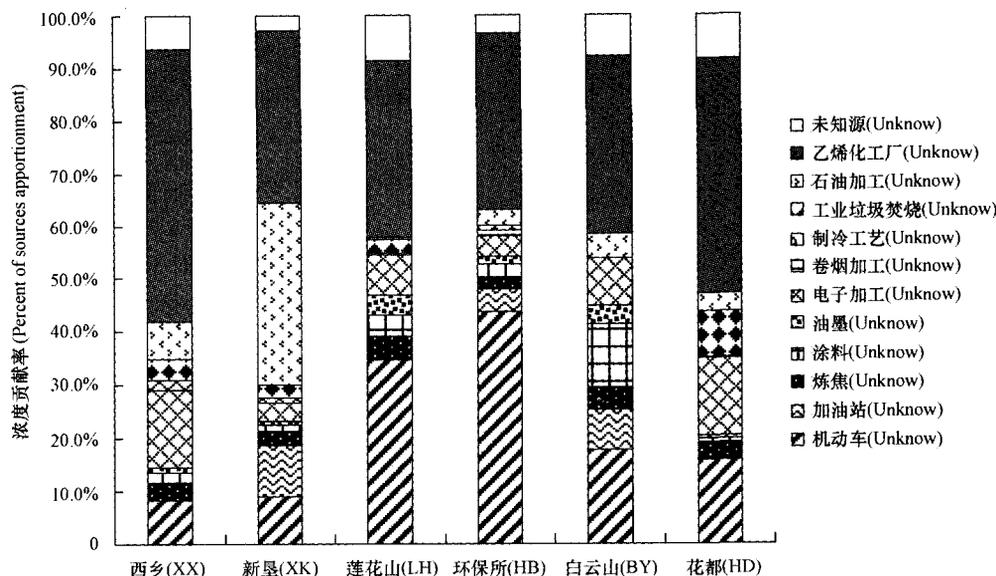


图 3 2002 年冬季沿主导风向各受体点 NMHCs 人为源的浓度贡献率

Fig. 3 Contributions of anthropogenic sources to NMHCs in the sampling sites in Winter 2002

面源在各受体点的浓度贡献率分布较为复杂, 各点情况不同, 主要表现为局地面源的影响. 例如, 花都主要来源于加油站 (21.5%)、涂料 (11.6%) 和电子加工 (10.8%), 而冬季主要为电子加工 (14.2%) 和工业垃圾焚烧 (8.2%); 环保所夏季和冬季均主要来源于加油站、电子加工和涂料; 而新

垦夏季主要为加油站 (15.2%)、电子加工 (6.4%) 和涂料 (4.1%), 冬季主要为加油站 (9.7%)、电子加工 (3.5%) 和炼焦 (2.7%).

城区受体点和郊区受体点的人为源贡献和 NMHCs 总浓度表现出一定的日变化规律 (见图 4).

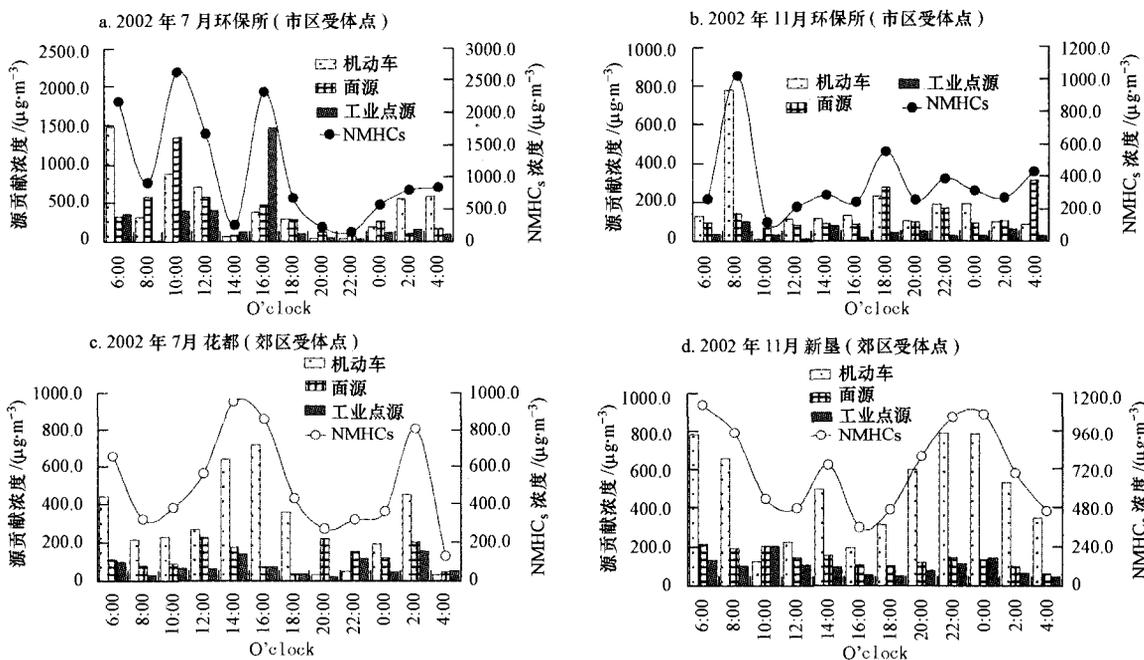


图 4 市区和郊区受体点各类源贡献与 NMHCs 总浓度的日变化特征

Fig. 4 Diurnal variation of the contributions of anthropogenic sources to NMHCs and total NMHC concentrations in urban and suburban sampling sites

无论夏季或冬季,城区 NMHCs 总浓度总呈现出明显的与上下班交通流量相关的日变化规律,因此,机动车排放是城区的主要污染源.郊区受体点除了受当地污染源排放的影响外,还明显受其上风向城市机动车等排放的影响.由于郊区离城区距离较远,因而郊区受体点机动车排放贡献的浓度并没有呈现出与市区一样的日变化规律.

#### 4 结论(Conclusions)

1)应用 CMB 8.0 受体模型对广州城区和郊区共 6 个受体点进行源解析,得到各人为源对广州地区 NMHCs(C<sub>2</sub>~C<sub>9</sub>)的平均浓度贡献率为:乙烯化工厂 29.7%、机动车 24.2%、加油站 12.1%、石油加工 9.0%、电子加工 8.3%、涂料工业 4.3%、工业垃圾焚烧 2.4%、炼焦工业 1.9%、油墨业 1.1%、卷烟加工 0.9%和制冷工艺 0.7%.乙烯化工工业点源和流动源为该地区 NMHCs 人为源的控制重点,而面源却是控制的难点.

2)夏季和冬季受体点人为源 NMHCs(C<sub>2</sub>~C<sub>9</sub>)的源贡献研究结果表明,各人为源对不同受体点的浓度贡献率差别很大,而且在夏季和冬季的情况也不同,但无论如何机动车排放均是广州城区的主要污染源.

**责任作者简介:**张远航(1957—),男,教授,博士生导师.1982 年北京大学本科毕业,1985 年获得北京大学环境化学专业硕士学位,1990 年获得北京大学环境化学专业博士学位,1993~1995 年在荷兰能源研究基金会(ECN)环境科学部从事博士后研究工作.现任北京大学环境科学与工程学院院长.研究领域为大气化学,承担了包括国家科技部 863 课题、973 课题和联合国 UNDP 援助项目等在内的研究二十余项,多项成果获得国家和省部级奖励.

#### References:

Atkinson R. 2000. Atmospheric chemistry of VOCs and NO<sub>x</sub> [J]. *Atmospheric Environment*, 34: 2063—2101

Anjali S. 2004. Source apportionment of ambient VOCs in Mumbai city [J]. *Atmospheric Environment*, 38: 6829—6843

Elizabeth V, Violeta M, Roc o C, *et al.* 2000. Hydrocarbon source apportionment in Mexico City using the chemical mass balance receptor model [J]. *Atmospheric Environment*, 34: 4121—4129

Fujita E M, Watson J G, Chow J C, *et al.* 1995. Receptor model and emissions inventory source apportionments of nonmethane organic gases in California's San Joaquin Valley and San Francisco Bay Area [J]. *Atmospheric Environment*, 29(21): 3019—3035

Gertler A W, Fujita E M, Pierson W R, *et al.* 1996. Apportionment of

NMHC tailpipe vs. non - tailpipe emissions in the Fort McHenry and Tuscarora Mountain tunnels [J]. *Atmospheric Environment*, 30: 2297—2305

Henry W, Claudia M, Violeta M, *et al.* 2006. Vertical profiles and receptor modeling of volatile organic compounds over Southeastern Mexico City [J]. *Atmospheric Environment*, 40: 5125—5136

Kwangsam N, Yong P K. 2007. Chemical mass balance receptor model applied to ambient C<sub>2</sub> C<sub>9</sub> VOC concentration in Seoul, Korea; Effect of chemical reaction losses [J]. *Atmospheric Environment*, 41: 6715—6728

Lu S H, Bai Y H, Zhang G S, *et al.* 2006. Source apportionment of anthropogenic emissions of volatile organic compounds [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26 (5): 757—763 (in Chinese)

Mugica A V, Vega R E, Arriaga C J L, *et al.* 1998. Determination of motor vehicle profiles for non - methane organic compounds in Mexico City metropolitan area [J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 48: 1060—1062

Peng L X, Tang X Y, Bai Y H, *et al.* 2000. Effect of biogenic hydrocarbon to photochemical pollution in Guangzhou [J]. *China Environmental Science*, 20(2): 132—135 (in Chinese)

Scheff P A, Wadden R A. 1993. Receptor modeling of volatile organic compounds 1. Emission inventory and validation [J]. *Environmental Science and Technology*, 27(4): 617—625

Seinfeld J H, Pandis S N. 1998. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change* [M]. USA: John Wiley & Sons, INC, 103—116

Shao M, Tang X Y, Zhang Y H, *et al.* 2006. City clusters in China: air and surface water pollution [J]. *Front Ecol Environ*, 4 (7): 353—361

Sheng G Y, Fu J M, Cheng Y, *et al.* 1999. Preliminary study on organic pollutants in atmosphere of Guangzhou, Hong Kong and Macao [J]. *Environmental Science*, 20(4): 6—11 (in Chinese)

Siegl W O, Hammerle R H, Herrmann H M, *et al.* 1999. Organic emissions profile for a light - duty diesel vehicle [J]. *Atmospheric Environment*, 33: 797—805

Sive B C. 1998. *Atmospheric Non-Methane Hydrocarbons: Analytical Methods and Estimated Hydroxyl Radical Concentrations* [M]. USA: University of California, Irvine, 16—211

Sive B C. 1998. *Atmospheric non - methane hydrocarbons: analytical methods and estimated hydroxyl radical concentrations* [D]. USA: University of California, Irvine. 16—121

Steven G B, Anna, Hilary R H. 2007. Source apportionment of VOCs in the Los Angeles area using positive matrix factorization [J]. *Atmospheric Environment*, 41: 227—237

Tang X Y, Zhang Y H, Shao M. 2006. *Atmospheric Environmental Chemistry* [M]. Beijing: Higher Education Press, 75—80 (in Chinese)

Wang B G, Zhang Y H, Shao M. 2004. Special and temporal distribution character of VOCs in the ambient air of Pearl River Delta region [J]. *Environmental Science*, 25(S): 7—15 (in Chinese)

Wang B G. 2002. Study on chemical speciation and source apportionment of atmospheric volatile organic compounds in pearl

- river delta[D]. Beijing: Peking University. 196—198 (in Chinese)
- Wang X M, Fu J M, Sheng G Y, *et al.* 1999. Characteristics and sources of atmospheric volatile hydrocarbons in Guangzhou streets[J]. *Environmental Science*, 20(5):30—33 (in Chinese)
- Wu D, Tie X X, Li C C, *et al.* 2005. An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study [J]. *Atmospheric Environment*, 39 (35):6568—6577
- Yang D Q, Bai Y H, Li J L. 2001. Study on hydrocarbon compounds from natural source in the Pearl River Delta area [J]. *China Environmental Science*, 21(5): 422—426 (in Chinese)
- 中文参考文献:**
- 陆思华,白郁华,张广山,等. 2006. 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*,26(5):757—763
- 彭立新,唐孝炎,白郁华,等. 2000. 天然源排放碳氢化合物对广州地区光化学烟雾的影响[J]. *中国环境科学*, 20(2): 132—135
- 盛国英,傅家谟,成玉,等. 1999. 粤港奥地区大气中有机污染物初步研究[J]. *环境科学*, 20(4):6—11
- 唐孝炎,张远航,邵敏. 2006. 大气环境化学[M]. 北京:高等教育出版社,75—80
- 王伯光,张远航,邵敏. 珠江三角洲大气环境 VOCs 的时空分布特征[J]. *环境科学*, 2004, 25(S):7—15
- 王伯光. 2002. 珠江三角洲大气挥发性有机污染物的组成特征及来源研究[D]. 北京:北京大学. 196—198
- 王新明,傅家谟,盛国英,等. 1999. 广州市街道空气中挥发烃类特征和来源分析[J]. *环境科学*, 20(5):30—33
- 杨丹青,白郁华,李金龙,等. 2001. 珠江三角洲地区天然源碳氢化合物的研究[J]. *中国环境科学*, 21(5): 422—426