

# 基于 COPERT 模式的北京市汽油车 蒸发 VOCs 排放清单

樊守彬<sup>1,2</sup> 田灵娣<sup>1,3</sup> 张东旭<sup>1,2</sup>

(1. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037; 2. 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037;  
3. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

**摘要** 汽油蒸汽挥发性有机成分(VOCs)排放是二次有机气溶胶和 O<sub>3</sub> 的重要前体物。应用 COPERT 模式和北京市实际参数, 计算了北京市典型汽油车辆蒸发 VOCs 排放因子和排放清单, 并测算了不同物种的排放量。结果显示: 北京市汽油车中以轻型载客汽车为主, 约占 90%, 国 IV 排放标准车辆比例最大; 随着排放标准等级的升高, 排放因子逐渐降低, 且与化油器技术相比, 使用燃油喷射系统技术的车辆运行损失排放较低; 环境温度、燃油饱和蒸汽压和炭罐尺寸是排放因子的主要因素, 温度越高、饱和蒸汽压越高、炭罐体积越小排放因子越大; 北京市汽油车蒸发 VOCs 年排放量为 11 115 t, 烷烃的质量占 76.93%, 烯烃质量占 5.76%, 炔烃质量占 0.08%, 芳香烃质量占 17.24%。

**关键词** 汽油车蒸发排放 VOCs 排放因子 排放清单

中图分类号 X511 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)06-3091-06 DOI 10.12030/j.cjee.201501068

## Emission inventory of gasoline evaporation from vehicles in Beijing based on COPERT model

Fan Shoubin<sup>1,2</sup> Tian Lingdi<sup>1,3</sup> Zhang Dongxu<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing 100037, China; 3. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract** Volatile organic compounds (VOCs) emitted from gasoline vapor are an important precursor for the formation of secondary organic aerosols and ozone. The COPERT model was used to calculate emission factors for typical gasoline vehicles based on actual parameters measured in Beijing, and an emission inventory for different chemical species was developed. The results showed that light-duty passenger cars accounted for about 90% of the gasoline vehicles in Beijing, and this vehicle type constituted the largest proportion of vehicles in Beijing that met the national IV emission standards. Now that emission standards are being improved, emission factors for vehicles are being lowered. The running loss emissions of vehicles using fuel injection systems were lower than those of vehicles using carburetor systems. The main influencing factors for vehicle emissions were the environmental temperature, fuel vapor pressure, and size of the carbon canister. Higher temperatures were associated with higher fuel oil saturation vapor pressures and emission factors. Additionally, smaller carbon canister volumes were associated with higher emission factors. The VOCs emissions from the evaporation of gasoline in Beijing were estimated at 11 115 t, of which alkanes, alkenes, alkynes, and arenes accounted for 76.93%, 5.76%, 0.08%, and 17.42% of the total amount, respectively.

**Key words** gasoline evaporation emission; VOCs; emission factor; emission inventory

目前京津冀城市群大气污染已经演变成以高浓度细粒子和高浓度臭氧污染为特征的典型“双高”污染区, 表现为能见度普遍下降, 重霾锁城事件频繁发生<sup>[1]</sup>。大气中挥发性有机物居高不下<sup>[2]</sup>, 直接导致二次有机气溶胶(SOA)上升趋势明显, 有机成分(OC)已跃居为细粒子中两大组成成分之一。北京

大气 PM<sub>1</sub> 中, OC 含量占 50%, 而其中 SOA 含量为

**基金项目** 国家科技支撑计划课题(2013BAC17B01); 北京市环境保护科学研究院科技基金项目(2013-B-04)

**收稿日期** 2015-01-12; **修订日期** 2015-02-02

**作者简介** 樊守彬(1981—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事大气污染控制研究工作。E-mail: fanshoubin@163.com

23%<sup>[3,4]</sup>。汽油蒸汽是二次有机气溶胶生成的重要前体物<sup>[5-6]</sup>。

夏季 O<sub>3</sub> 污染严重影响了北京城区的空气质量, 臭氧生成效率 (OPE) 值与 NO<sub>x</sub> 浓度之间为非线性关系, OPE 值随 NO<sub>x</sub> 浓度的增加而减少, 表明消减测点附近 VOCs 排放能有效降低 O<sub>3</sub> 浓度<sup>[7]</sup>。VOCs 对于 O<sub>3</sub> 的控制至关重要, 并提出要加强机动车蒸发排放和溶剂使用 VOCs 排放, 并考虑区域传输的影响<sup>[8]</sup>。分析了中国汽油蒸发 VOCs 排放的成分谱并对 O<sub>3</sub> 生成潜势进行计算, 由于烯烃含量高, 其 O<sub>3</sub> 生成潜势是美国的 2 倍<sup>[9]</sup>。

汽油车蒸发排放是大气 VOCs 重要来源之一, 日本的研究结果显示, 汽油车蒸发排放对总 VOCs 排放量的贡献为 4.6%, 是第 6 大排放源<sup>[10]</sup>。并且不同的地区排放差异很大, 在南非的测试结果显示, 随着燃油温度的升高, 日常排放逐渐增加, 南非的汽油车蒸发排放比美国环保局限值高 10 倍<sup>[11]</sup>。在蒸发 VOCs 排放测算方面, 有文献报道了计算安装有炭罐的汽油车蒸发排放 VOCs 的经验模型, 模型与实测结果具有较好的相关性<sup>[12]</sup>。为了验证模型的有效性, 开发了一套测试程序, 对模型的输入参数进行了广泛的验证, 运用自下而上的模型方法和自上而下的测试方法预测了蒸发排放水平<sup>[13]</sup>。通过在线的全球定位系统 (GPS) 对车辆的行驶模式和停车发生率等参数进行了广泛的采集和统计分析, 应用数据通关模型方法分析了蒸发排放特征, 并对控制系统的测试程序改进提出了建议<sup>[14]</sup>。

汽油车蒸发 VOCs 排放主要包括以下 2 个方面: 由于气温变化在行驶和停车过程的呼吸排放, 主要从油箱通风口排出; 燃油渗透和泄漏, 研究证实液体燃料通过塑料和橡胶管路渗漏和渗透排放<sup>[15-16]</sup>。

欧洲在 1993 年前对蒸发排放都没有控制, 在欧 I 和欧 II 排放标准中设定了 2.0 g/测量循环的限值 (Directive 91/441/EEC), 为了这个限值装一个在线的小活性炭罐, 欧 III 和欧 IV 排放 (Directive 98/69/EC) 标准的限值仍然保持 2.0 g/test, 但实验程序严格得多, 为了符合要求需要装一个更大的炭罐。

我国 1995 年定型、生产的轻型汽车排放标准限值为 2 g/测量循环, 1996 年定型、生产的重型汽车排放标准限值为 4 g/测量循环。之后我国陆续发布了国 I 至国 V 阶段的轻型汽车污染物排放限值及测量方法, 排放限值均为 2 g/次实验。对于摩托车的燃油蒸发排放, 规定从 2010 年起销售的摩托车燃油

蒸发污染物排放限值为 2 g/次实验。

本研究根据北京市汽油车的构成情况、运行数据、油品参数和气象条件等实际参数, 应用 COPERT 模式计算了北京市汽油车蒸发 VOCs 排放因子, 并对排放特征进行分析, 为制定相关控制措施提供依据。

## 1 研究方法

### 1.1 模型介绍

COPERT 模型起源于欧洲委员会 (EC) 开展的机动车排放因子研究, 经多年完善形成了目前的可以由计算机程序实现的 COPERT IV 模型。该模型采用了大量可靠的实验数据, 可以兼容不同国家标准和参数变量, 为欧洲国家所广泛应用。由于我国机动车排放标准采用欧洲体系, 运用该模型计算排放因子会更适合我国机动车的实际情况<sup>[17]</sup>。应用 COPERT IV 模型计算排放因子, 需要的参数包括车队组成、平均行驶速度、平均旅程长度、燃料参数和气候参数等。这些参数的取值最终决定排放因子的不同, 因此如何确定参数是研究的关键<sup>[18]</sup>。近年来, 我国应用该模型进行了一些机动车排放的研究工作<sup>[17,19]</sup>, 针对不同模型和实测数据的比较研究结果显示, COPERT 模型更为适合预测中国的机动车排放<sup>[20]</sup>。通过调研北京市的实际参数, 利用 COPERT IV 模型计算汽油车蒸发 VOCs 污染物的排放因子。

### 1.2 计算原理

在模拟车辆蒸发排放时, 一般会考虑 3 个方面的排放机制: 日常排放、运行损失、热浸排放, 3 个排放机制都包含呼吸排放和渗透排放。汽油的运输、在加油站的存储和车辆加油过程也有蒸发排放, 但本研究中不包含这部分排放。日常排放是指在白天气温上升时间内汽油和油气由于热膨胀使油气排放进入大气, 燃料渗透和泄漏排放也是日常排放的重要组成部分。运行损失排放是指车辆运行过程中油箱产生的蒸汽排放, 老旧的车辆由于装有化油器或燃油回收系统, 发动机的运行导致油箱和汽化器温度大幅升高, 这会使油箱内产生大量蒸汽。对于装有燃油喷射并无回油管的燃油系统的汽油车, 发动机运行不会影响燃油温度也不会产生额外的蒸汽, 所以运行损失排放非常低, 燃料渗透和泄漏排在运行过程中也会发生。热浸排放是指发动机关闭后的排放, 发动机和尾气系统的热能使系统中的燃油 (不再流动的部分) 温度升高, 化油器的浮筒是重要

的排放源。对于装有燃油喷射并无回油管的燃油系统的汽油车,发动机关闭后不会再产生额外的蒸汽,此时热浸排放主要是由于燃料渗透和泄漏。3 个方面排放主要的影响因素包括汽油的挥发性、气温和气温的变化以及车辆设计特征,对于热浸排放和运行损失排放驾驶特征也有重要的影响。

应用公式(1)计算机动车蒸发 VOC 排放量。

$$E_{\text{VOC}} = \sum_s D_s \times \sum_j N_j \times (HS_j + E_{dj} + RL_j) \quad (1)$$

式中:  $E_{\text{VOC}}$  为机动车蒸发 VOC 年排放量, g;  $D_s$  为蒸发排放的时间, d;  $N_j$  为  $j$  类型车辆的保有量;  $HS_j$  为  $j$  类型车辆日均浸透(热、温、冷)排放, g/d, 用公式(2)计算;  $E_{dj}$  为  $j$  类型车辆日均日常排放, g/d;  $RL_j$  为  $j$  类型车辆日均运行损失(热、温、冷)排放, g/d, 用公式(3)计算。

$$HS_j = x \{ c[pE_{s,\text{hot},c} + (1-p)E_{s,\text{warm},c}] + (1-c)E_{s,\text{hot},fi} \} \quad (2)$$

$$RL_j = x \{ c[pE_{r,\text{hot},c} + (1-p)E_{r,\text{warm},c}] + (1-c)E_{r,\text{hot},fi} \} \quad (3)$$

式中:  $x$  为年平均的每辆车日出行次数, 旅程/d;  $c$  为安装化油器或燃油回收系统的汽油车比例;  $p$  为以热发动机结束旅程的比例, 即发动机达到正常的运行温度和催化剂的点火温度(取决于月均环境温度);  $E_{s,\text{hot},c}$  为安装化油器或燃料回收系统汽油车的热浸排放因子, g/次;  $E_{s,\text{warm},c}$  为安装化油器或燃料回收系统汽油车的温、冷浸透排放, g/次;  $E_{s,\text{hot},fi}$  为安装燃油喷射或无燃料回收系统汽油车的热浸排放因子, g/次;  $E_{r,\text{hot},c}$  为安装化油器或燃料回收系统汽油车的热运行损失排放因子, g/次;  $E_{r,\text{warm},c}$  为安装化油器或燃料回收系统汽油车的温、冷运行损失排放因子, g/次;  $E_{r,\text{hot},fi}$  为安装燃油喷射或无燃料回收系统汽油车的热运行损失排放因子, g/次。

### 1.3 数据获取方法

本研究通过车管部门获得北京市分车型和分登记注册年份的汽油车保有量, 并通过登记注册年份和标准颁布实施日期确定不同排放标准等级车辆的比例, 通过现场调研获得不同车型车辆的年行驶里程和日出行次数, 根据统计年鉴数据获得月均气温、月最高气温和最低气温等数据, 根据北京市目前执行的车用汽油标准规定的蒸汽压水平, 蒸汽压限值从 11 月 1 日至 4 月 30 日为 45 ~ 85 kPa, 5 月 1 日至 10 月 31 日为 42 ~ 65 kPa, 把相关数据输入模型进

行排放因子、排放量和 VOCs 物种计算。

## 2 排放特征

### 2.1 北京市汽油车现状

本研究调研了截至 2012 年底的北京市汽油车分车型分注册登记年份的车辆保有量数据, 结果为汽油车保有量为约 487 万辆, 其中主要为轻型载客汽车, 占汽油车保有量的 90%, 微型载客汽车占 3%, 中型和大型载客汽车占 2%, 载货汽车占 2%, 主要为轻型载货汽车, 摩托车占 3%。

根据车辆的注册登记年份和北京市机动车排放标准实施日期, 推算不同标准等级车辆的数量, 北京市 2012 年汽油车排放标准等级构成比例为国 IV 排放标准的车辆比例最高, 为 57%, 其他 3 个等级比例相近, 分别占 14% ~ 15%。并且随着北京淘汰老旧车措施的实施, 国 I 及以下、国 II 和国 III 排放标准的车辆会逐渐减少。

车辆的行驶里程和每次旅程的里程数或日均出行次数是影响蒸发排放的重要参数, 本研究中根据文献报道和调研确定了不同类型车辆的年行驶里程和每次出行的里程数, 根据报道, 北京市机动车年均行驶里程, 轻型客车为 23 479 km/a, 重型客车为 66 466 km/a, 轻型货车为 44 000 km/a, 重型货车为 62 433 km/a<sup>[21]</sup>, 本研究中调研了汽油出租车的年行驶里程为 103 000 km, 根据调研数据对文献资料进行了更新。根据北京市交通年报, 2012 年北京市私家车日均出行次数为 2.70 ~ 2.71 次<sup>[22]</sup>。

### 2.2 典型车型蒸发 VOCs 排放因子

由于轻型载客汽车占汽油车保有量的 90%, 本研究以排量在 0.8 ~ 1.4 L 的轻型载客汽车为例, 应用 COPERT 模式计算了蒸发 VOCs 的排放因子, 不同排放环节的排放因子见表 1。从表中可以看出, 随着排放标准等级的升高, 排放因子逐渐降低, 并且由于北京市在用车主要为国 I 以上排放标准车辆, 采用了燃油喷射技术, 车辆运行损失排放因子都很低。表 2 是轻型载货汽车(<3.5 t)蒸发 VOCs 排放因子, 从表中可以看出, 排放因子呈现与轻型载客汽车相同的规律。表 3 是四冲程摩托车(>750 cm<sup>3</sup>)蒸发 VOCs 排放因子, 从表中可以看出, 排放因子小于轻型载客汽车和轻型载货汽车, 但运行损失排放较大。

### 2.3 排放因子的主要影响因素

环境温度、温度变化、燃油饱和蒸汽压以及控制

表 1 排量 0.8 ~ 1.4 L 的轻型载客汽车蒸发 VOCs 排放因子

| Table 1 Evaporative emissions factors for gasoline passenger cars <1.4 L |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 排放标准等级                                                                   | 欧 I   | 欧 II  | 欧 III | 欧 IV  |
| 日常排放量 (g/d)                                                              | 8.596 | 8.232 | 2.994 | 2.152 |
| 温浸透排放 (g/次)                                                              | 2.009 | 1.942 | 0.622 | 0.457 |
| 热浸透排放 (g/次)                                                              | 2.734 | 2.648 | 0.839 | 0.621 |
| 浸透燃油喷射 (g/次)                                                             | 0.056 | 0.056 | 0.056 | 0.056 |
| 温运行损失排放 (g/次)                                                            | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.014 |
| 热运行损失排放 (g/次)                                                            | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.014 |
| 运行损失燃油喷射 (g/次)                                                           | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.014 |

表 2 轻型载货汽车 (<3.5 t) 蒸发 VOCs 排放因子

| Table 2 Evaporative emissions emission factors for gasoline truck <3.5 t |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 排放标准等级                                                                   | 欧 I   | 欧 II  | 欧 III | 欧 IV  |
| 日常排放量 (g/d)                                                              | 5.314 | 4.928 | 2.344 | 2.075 |
| 温浸透排放 (g/次)                                                              | 1.396 | 1.301 | 0.492 | 0.457 |
| 热浸透排放 (g/次)                                                              | 2.021 | 1.899 | 0.672 | 0.626 |
| 浸透燃油喷射 (g/次)                                                             | 0.056 | 0.056 | 0.056 | 0.056 |
| 温运行损失排放 (g/次)                                                            | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.014 |
| 热运行损失排放 (g/次)                                                            | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.014 |
| 运行损失燃油喷射 (g/次)                                                           | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.014 |

表 3 摩托车 (>750 cm³) 蒸发 VOCs 排放因子

| Table 3 Evaporative emissions emission factors for motorcycle (>750 cm³) |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 排放标准等级                                                                   | 欧 I 前 | 欧 I   | 欧 II  | 欧 III |
| 日排放量 (g/d)                                                               | 4.411 | 3.270 | 2.905 | 2.720 |
| 温浸透排放 (g/次)                                                              | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 热浸透排放 (g/次)                                                              | 0.635 | 0.426 | 0.364 | 0.332 |
| 浸透燃油喷射 (g/次)                                                             | 0.439 | 0.293 | 0.247 | 0.225 |
| 温运行损失排放 (g/次)                                                            | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 热运行损失排放 (g/次)                                                            | 0.564 | 0.382 | 0.325 | 0.294 |
| 运行损失燃油喷射 (g/次)                                                           | 0.440 | 0.291 | 0.246 | 0.224 |

措施都是影响蒸发排放的主要因素,本研究对不同环境温度和汽油饱和蒸汽压下的蒸发排放因子进行分析,以排量 <1.4 L 安装小炭罐的的轻型载客汽车为例,蒸发 VOCs 排放因子与环境温度(℃)/饱和蒸汽压(kPa)的关系见图 1。从图中可以看出,随着温度的升高,排放因子逐渐增大。

在温度 20 ~ 35 ℃,汽油饱和蒸汽压为 60 kPa 的情况下,以排量 <1.4 L 的轻型载客汽车为例,分析了不同控制措施下蒸发 VOCs 排放因子,见图 2,对于车辆的分类分为装有化油器或燃油回收系统和装有燃油喷射并无回油管的燃油系统的汽油车,对于控制装置分为无炭罐、小炭罐、中炭罐和大炭罐。

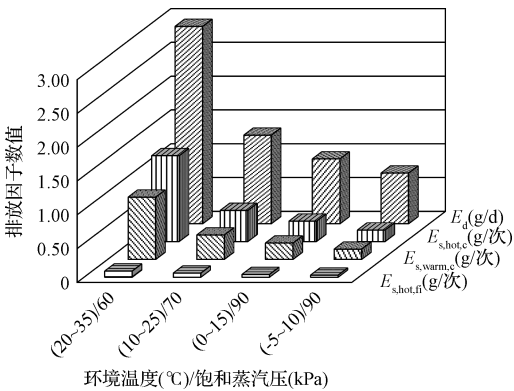


图 1 排放因子与环境温度/饱和蒸汽压的关系

Fig. 1 Relationship of emission factors and temperature/fuel DVPE

从图中可以看出,化油器和燃油回收系统的汽油车排放因子大,燃油喷射无回油管的燃油系统的汽油车排放因子小,随着炭罐体积增大,蒸发 VOCs 排放因子降低。

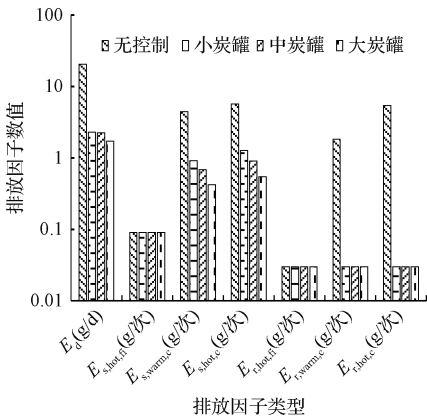


图 2 不同控制装置的蒸发 VOC 排放因子

Fig. 2 Evaporative emissions factors for different control measures

2.4 排放清单及不确定性分析

根据机动车保有量、行驶里程、车速、油品和气象等相关参数,模型详细输出不同车型的不同污染物排放量,通过统计分析得到 2012 年机动车排放量为 11 115 t,根据不同物种的质量比例<sup>[23]</sup>对不同物种的排放量进行了计算,结果见表 4。从表中可以看出,烷烃的质量占 76.93%,烯烃质量占 5.76%,炔质量占 0.08%,芳香烃质量占 17.24%。

在汽油车蒸发 VOCs 排放的估算过程中,其估算误差主要来自以下 2 个方面:在活动水平方面,不同车型的年或日行驶里程以及日均出行次数是通关过文献或典型调查获得,与真实的车辆活动规律可

能存在差异。并且北京市实施的尾号限行政策导致小汽车每周 1 d 的限行,这对车辆的出行和蒸发排放规律也会差生影响。在排放因子方面,我国的排放标准与欧洲的排放标准体系较为一致,但是我国实际车辆的蒸发 VOCs 控制措施的有效性或故障率并没有测试数据参考,控制措施失效会大幅度提高排放水平,这也会对估算结果产生影响。

表 4 蒸发排放 VOCs 的物种构成

| Table 4 Composition of VOCs in evaporative emissions |           |         |          |
|------------------------------------------------------|-----------|---------|----------|
| 类别                                                   | 物种        | 质量比例(%) | 排放量(t)   |
| 烷烃                                                   | 乙烷        | 0.3     | 33.3     |
|                                                      | 丙烷        | 5.15    | 572.4    |
|                                                      | 异丁烷       | 4.38    | 486.8    |
|                                                      | 正丁烷       | 5.86    | 651.3    |
|                                                      | 异戊烷       | 10.69   | 1 188.2  |
|                                                      | 正戊烷       | 7.72    | 858.1    |
|                                                      | 2-甲基戊烷    | 14.02   | 1 558.3  |
|                                                      | 3-甲基戊烷    | 25.14   | 2 794.3  |
|                                                      | 正己烷       | 2.02    | 224.5    |
|                                                      | 正庚烷       | 1.65    | 183.4    |
| 烯烃                                                   | 乙烯        | 0.05    | 5.6      |
|                                                      | 丙烯        | 0.28    | 31.1     |
|                                                      | 正丁烯       | 0.72    | 80.0     |
|                                                      | 反式-2-丁烯   | 1.19    | 132.3    |
|                                                      | 异丁烯       | 0.12    | 13.3     |
|                                                      | 顺式-2-丁烯   | 1.05    | 116.7    |
|                                                      | 1,3-丁二烯   | 0       | 0.0      |
|                                                      | 反-2-戊烯    | 1.6     | 177.8    |
|                                                      | 顺-2-戊烯    | 0.75    | 83.4     |
|                                                      | 异戊二烯      | 0       | 0        |
| 炔烃                                                   | 丙炔        | 0.07    | 7.8      |
|                                                      | 乙炔        | 0.01    | 1.1      |
| 芳香烃                                                  | 苯         | 0.97    | 107.8    |
|                                                      | 甲苯        | 3.94    | 437.9    |
|                                                      | 乙苯        | 3.52    | 391.2    |
|                                                      | 间二甲苯      | 5.79    | 643.6    |
|                                                      | 邻二甲苯      | 2.52    | 280.1    |
|                                                      | 1,2,4-三甲苯 | 0.5     | 55.6     |
|                                                      | 1,3,5-三甲苯 | 0       | 0        |
|                                                      | 合计        | 100     | 11 115.0 |

3 结 论

北京市汽油车中轻型载客汽车占 90%,是主要的汽油车类型,国 IV 排放标准车辆比例最大,达到 57%;车辆蒸发 VOCs 排放因子随着排放标准等级的升高逐渐降低,使用燃油喷射系统技术的车辆运行损失排放较低,与日常排放相比几乎可以忽略,摩托车的排放因子小于轻型载客汽车和轻型载货汽车;环境温度、燃油饱和蒸汽压和炭罐尺寸是排放因

子的主要因素,温度越高、饱和蒸汽压越高、炭罐体积越小排放因子越大;北京市汽油车蒸发 VOCs 年排放量为 11 115 t,烷烃的质量占 76.93%,烯烃质量占 5.76%,炔烃质量占 0.08%,芳香烃质量占 17.24%。

参 考 文 献

[1] 王跃思,张军科,王莉莉,等. 京津冀区域大气霾污染研究意义、现状及展望. 地球科学进展, **2014**, 29(3): 388-396

Wang Yuesi, Zhang Junke, Wang Lili, et al. Researching significance, status and expectation of haze in Beijing-Tian-jin-Hebei region. *Advances in Earth Science*, **2014**, 29(3): 388-396 (in Chinese)

[2] Wang Yuesi, Ren Xiyan, Ji Dongsheng, et al. Characterization of volatile organic compounds in the urban area of Beijing from 2000 to 2007. *Journal of Environmental Science*, **2012**, 24(1): 95-101

[3] Liu Quan, Sun Yang, Hu Bo, et al. *In situ* measurement of PM<sub>1</sub> organic aerosol in Beijing winter using a high-resolution aerosol mass spectrometer. *Chinese Science Bulletin*, **2012**, 57(7): 819-826

[4] Zhang J. K., Sun Y., Liu Z. R., et al. Characterization of submicron aerosols during a serious pollution month in Beijing (2013) using an aerodyne high-resolution aerosol mass spectrometer. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, **2013**, 13(7): 19009-19049

[5] Hoffmann T., Odum J., Bowman F., et al. Aerosol formation potential of biogenic hydrocarbons. *Journal of Aerosol Science*, **1996**, 27(S1): S233-S234

[6] Odum J. R., Jungkamp T. P. W., Griffin R. J., et al. The atmospheric aerosol-formation potential of whole gasoline vapor. *Science*, **1997**, 276(5309): 96-99

[7] 徐敬,马建中,张小玲,等. 北京城区夏季 O<sub>3</sub> 化学生成过程. 环境科学学报, **2012**, 32(1): 93-100

Xu Jing, Ma Jianzhong, Zhang Xiaoling, et al. Chemical production process of ozone in summer in Beijing urban area. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **2012**, 32(1): 93-100 (in Chinese)

[8] Liu H., Wang X. M., Pang J. M., et al. Feasibility and difficulties of China's new air quality standard compliance: PRD case of PM<sub>2.5</sub> and ozone from 2010 to 2025. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **2013**, 13(23): 12013-12027

[9] Zhang Yanli, Wang Xinming, Zhang Zhou, et al. Species profiles and normalized reactivity of volatile organic compounds from gasoline evaporation in China. *Atmospheric*

- Environment, **2013**, 79: 110-118
- [10] Yamada H. Contribution of evaporative emissions from gasoline vehicles toward total VOC emissions in Japan. *Science of the Total Environment*, **2013**, 449: 143-149
- [11] Van der Westhuisen H., Taylor A. B., Bell A. J., et al. Evaluation of evaporative emissions from gasoline powered motor vehicles under South African conditions. *Atmospheric Environment*, **2004**, 38(18): 2909-2916
- [12] Mellios G., Samaras Z. An empirical model for estimating evaporative hydrocarbon emissions from canister-equipped vehicles. *Fuel*, **2007**, 86(15): 2254-2261
- [13] Mellios G., Samaras Z., Martini G., et al. A vehicle testing programme for calibration and validation of an evaporative emissions model. *Fuel*, **2009**, 88(8): 1504-1512
- [14] Martini G., Paffumi E., De Gennaro M., et al. European type-approval test procedure for evaporative emissions from passenger cars against real-world mobility data from two Italian provinces. *Science of the Total Environment*, **2014**, 487: 506-520
- [15] Coordinating Research Council. Fuel permeation from automotive systems. Final Report, Sacramento, CA: California Environmental Protection Agency, **2004**
- [16] Reuter R. M., Benson J. D., Brooks D. J., et al. Sources of vehicles emissions in three day diurnal SHED tests; Auto/oil air quality improvement research program. Livonia, MI: SAE, **1994**
- [17] 樊守彬. 北京机动车尾气排放特征研究. *环境科学与管理*, **2011**, 36(4): 28-31  
Fan Shoubin. Tail-pipe emission characteristics from on-road vehicles in Beijing. *Environmental Science and Management*, **2011**, 36(4): 28-31 (in Chinese)
- [18] 马因韬, 刘启汉, 雷国强, 等. 机动车排放模型的应用及其适用性比较. *北京大学学报(自然科学版)*, **2008**, 44(2): 308-316  
Ma Yintao, Lau A. K. H., Louie P. K. K., et al. Application of vehicular emission models and comparison of their adaptability. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, **2008**, 44(2): 308-316 (in Chinese)
- [19] 蔡皓, 谢绍东. 中国不同排放标准机动车排放因子的确定. *北京大学学报(自然科学版)*, **2010**, 46(3): 319-326  
Cai Hao, Xie Shadong. Determination of emission factors from motor vehicles under different emission standards in China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, **2010**, 46(3): 319-326 (in Chinese)
- [20] 程颖, 于雷, 王宏图, 等. 基于 PEMS 的 MOBILE 与 COPERT 排放模型对比研究. *交通运输系统工程与信息*, **2011**, 11(3): 176-181  
Cheng Ying, Yu Lei, Wang Hongtu, et al. Comparative study of MOBILE and COPERT emission models based on PEMS. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, **2011**, 11(3): 176-181 (in Chinese)
- [21] Lang Jianlei, Cheng Shuiyuan, Wei Wei, et al. A Study on the Trends of Vehicular Emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) Region, China. *Atmospheric Environment*, **2012**, 62: 605-614
- [22] 北京交通发展研究中心. 2013 年北京交通发展年报. 北京: 北京交通发展研究中心, **2013**
- [23] Mellios G., Ntziachristos L. Gasoline evaporation from vehicles. Copenhagen, Denmark: European Environment Agency, **2013**