

基于 MOVES 模型的西安市机动车排放清单研究*

郝艳召¹ 邓顺熙² 邱兆文¹ 刘 强² 高婵娟² 徐月云³

(1. 长安大学汽车学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710064;

3. 中国汽车技术研究中心, 天津 300300)

摘要 利用本地化修正的 MOVES 模型结合实地调研数据, 测算了西安市机动车排放清单, 并对各种污染物的排放分担率进行了分析。结果表明: 2012 年西安市机动车的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_x 、总碳氢化合物 (THC)、CO、挥发性有机物 (VOCs)、 NH_3 和 SO_2 排放总量分别为 1 890.48、2 668.89、40 847.75、19 413.30、217 103.04、15 244.86、539.76、2 087.50 t; 中型货车和重型货车是 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 NO_x 的主要贡献者, 小型客车和摩托车是 THC、CO 和 VOCs 的主要贡献者, 小型客车是 NH_3 的主要贡献者, 小型客车与重型货车对 SO_2 的排放分担率均较高; 柴油车对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_x 和 SO_2 的排放分担率高于汽油车, 而汽油车对 THC、CO、VOCs 和 NH_3 的分担率则高于柴油车; CO 在冬季排放最多, 其余污染物的排放均在夏季最多, 但污染物的季节变化总体上不明显。

关键词 机动车 排放清单 排放分担率 MOVES 模型

DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2017.03.001

Vehicle emission inventory for Xi'an based on MOVES model HAO Yanzhao¹, DENG Shunxi², QIU Zhaowen¹, LIU Qiang², GAO Chanjuan², XU Yueyun³. (1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064; 2. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064; 3. China Automotive Technology & Research Center, Tianjin 300300)

Abstract: The MOVES model with localized modification and vehicle data collected in Xi'an were used to calculate vehicle emission inventory in this city. The contribution rates for various pollutants were also analyzed. The results showed that the total vehicle emissions of $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_x , total hydrocarbon (THC), CO, volatile organic compounds (VOCs), NH_3 and SO_2 in 2012 were 1 890.48, 2 668.89, 40 847.75, 19 413.30, 217 103.04, 15 244.86, 539.76 and 2 087.50 t. The middle and heavy duty trucks were main contributors to $PM_{2.5}$, PM_{10} and NO_x . The small passenger car and motorcycle were main contributors to THC, CO and VOCs. Meanwhile, the small passenger car had the highest contribution rate to NH_3 , and its contribution to SO_2 was also the highest, followed by the heavy duty truck. The contribution rates of diesel vehicle to $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_x and SO_2 were higher than gasoline vehicle, but gasoline vehicle had higher contribution rates to THC, CO, VOCs and NH_3 . For different seasons, CO emission in winter was the highest, while other pollutant emissions in summer were the highest. However, the seasonal variation of pollutants was generally not obvious.

Keywords: vehicle; emission inventory; emission contribution rate; MOVES model

随着我国工业化、城市化进程的加快, 区域大气污染问题越来越严重, 影响了人们的身体健康和正常生活。另一方面, 我国城市规模扩大和人民生活水平提高, 导致机动车保有量迅速增长, 基于北京市、天津市、重庆市和成都市的研究表明, 机动车排放对大气环境污染的贡献率为 15%~35%, 已经成为我国大气污染物的一大主要来源^[1-4]。

西安市作为我国西北地区的中心城市和“丝绸之路”经济带的重要节点城市, 近年来随着经济的发

展雾霾天气频发, 一度跃居全国空气污染排行榜前 10 位。西安市机动车保有量已经从 2000 年的 13.5 万辆增长到 2012 年的 160.9 万辆, 年均增长率为 23% 左右。2010 年西安市机动车排放的 $PM_{2.5}$ 占大气环境中全部颗粒物来源的 17%^[5], 西安市已经步入煤烟和机动车尾气混合型污染阶段, 并且机动车污染的贡献比例会继续增加^[6]。

以西安市为研究区域, 采用实际调研和模型模拟相结合的方法建立该城市 2012 年的机动车排放

第一作者: 郝艳召, 男, 1981 年生, 博士, 讲师, 主要从事交通环境与污染控制研究。

* 国家自然科学基金资助项目 (No. 51478045、No. 21607014); 陕西省科技统筹创新工程项目 (No. 2012KTZB03-01); 中国新能源汽车产品检测工况研究和开发项目。

清单,考虑的污染物包括 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_x 、总碳氢化合物(THC)、CO、挥发性有机物(VOCs)、 NH_3 和 SO_2 ,共计8种。研究结果能够为合理评估机动车污染对大气环境的影响提供数据支撑,为因地制宜制定机动车排放控制策略提供指导。

1 排放清单建立方法

采用“机动车排放因子 $\times$ 保有量 $\times$ 行驶里程”的方法来建立西安市机动车排放清单,其中机动车排放因子是建立排放清单的一个关键参数。通常可利用台架测试或车载测试等方法来定量评估被测机动车在特定运行条件下的排放因子^[7],但要确定区域车队的平均排放则工作量巨大。与之相比,机动车排放模型通过数学和物理等方法解析出影响机动车排放的一些共性的、关键性的因素,并建立其与机动车排放的关系,从而实现了不同区域的适用性,对于研究大范围区域的机动车污染排放具有明显的优势^[8]。

1.1 模型选取

目前我国尚未建立健全的机动车排放因子数据库或排放模型,国内学者大多采用国外较成熟的模型来开展排放清单研究,常用的主要有MOBILE、COPERT和IVE模型。吴焯等^[9]和车汶蔚等^[10]利用MOBILE模型分别建立了澳门1999年和珠江三角洲2006年的机动车排放清单;廖瀚博等^[11]和曾雪兰等^[12]利用COPERT模型分别对广州市2008年和佛山市2010年的机动车排放特征进行了分析;王孝文等^[13]和冯晓等^[14]利用IVE模型分别建立了杭州市2010年和重庆市2011年的机动车排放清单。

除了上述3种模型,近年来美国环境保护署发布了新一代排放模型——MOVES模型^[15],该模型内嵌了大量机动车排放的台架和车载实测数据,能够运用于国家、城市和路段等尺度的排放模拟研究。与MOBILE模型相比,MOVES模型的模拟精度更高^[16];并且,MOVES模型采用了可视化的用户操作界面和开放式的数据库管理系统,用户可通过设置自定义区域进行模型的本地化修正。岳园圆等^[17]利用实测排放数据验证了该模型在我国的适用性,邱兆文等^[18]利用该模型模拟评估了平面交叉口区域的机动车排放污染。基于以上研究,选取MOVES模型作为初始模型,并利用实地调研数据对模型进行本地化修正,再开展后续的排放模拟与测算。

1.2 模型本地化修正

1.2.1 车型划分与匹配

参考环境保护部车型分类^[19],将机动车划分为8类,包括载客汽车3类、载货汽车3类、摩托车1类、低速汽车1类,具体见表1。此外,依据机动车用途和质量参数完成与MOVES模型中的车型匹配。

1.2.2 基本情境设定

测算基准年为2012年,测算周期为全年12个月,工作日和周末均进行全天24h测算。由于我国的机动车排放标准限值执行滞后于美国3~5a^[20],因此在MOVES模型中将模拟年选择为2008年,以便与西安市当地2012年的机动车排放水平相吻合。此外,本研究的测算区域为整个西安市(包括市区和郊区),在MOVES模型中选择城市为测算尺度,道路类型包括快速路、非快速路、高速路和非高速路4种,并通过设置自定义区域来输入所收集的数据。

表1 车型分类
Table 1 Vehicle type classification

车型	描述
载客汽车	小型客车 车长<6 m、乘坐人数 ≤ 9 的载客汽车
	中型客车 车长<6 m、乘坐人数为10~19的载客汽车
	大型客车 车长 ≥ 6 m或者乘坐人数 ≥ 20 的载客汽车
载货汽车	轻型货车 车长<6 m且总质量<4.5 t的载货汽车
	中型货车 车长 ≥ 6 m或总质量为4.5~<12 t的载货汽车,但不包括低速货车
	重型货车 总质量 ≥ 12 t的载货汽车
摩托车	包括轻便摩托车和普通摩托车
低速汽车	包括三轮汽车和低速货车

1.2.3 机动车数据收集

通过查阅西安市2001—2013年的统计年鉴,获得该城市各类机动车的保有量、车龄分布和燃油比例数据。

1.2.4 活动水平数据收集

活动水平数据包括机动车的行驶速度、年均行驶里程及其分布。通过在年检站实地询问驾驶员收集了690辆载客汽车和642辆载货汽车的车龄及累积行驶里程数据,同时结合文献^[21]、^[22]确定了各类机动车的年均行驶里程。此外,利用全球定位系统(GPS)针对20辆载客汽车和10辆载货汽车开展了为期1个月的逐秒行驶速度数据收集,覆盖了西安市的大部分地区和多种道路类型。将数据进行地图匹配后可得到机动车在各类道路的日行驶速度、日行驶里程分布和小时行驶速度、小时行驶里程分布,月行驶里程分布采用模型默认值。

1.2.5 其他参数输入

燃油组分信息分别根据《车用汽油》(GB 17930—

表 2 2012 年西安市不同车型机动车的排放因子
Table 2 Vehicle emission factors for Xi'an in 2012

车型	PM _{2.5}	PM ₁₀	NO _x	THC	CO	VOCs	NH ₃	SO ₂
小型客车	0.011	0.028	0.350	0.261	4.994	0.241	0.016	0.030
中型客车	0.077	0.103	1.830	0.697	8.399	0.674	0.024	0.064
大型客车	0.141	0.173	4.264	0.681	12.739	0.490	0.012	0.117
轻型货车	0.041	0.063	1.126	0.333	5.318	0.313	0.017	0.057
中型货车	0.322	0.399	6.307	1.176	20.217	1.158	0.021	0.231
重型货车	0.196	0.262	4.037	0.452	4.427	0.442	0.017	0.192
摩托车	0.027	0.032	0.611	3.945	24.999	3.852	0.019	0.024
低速汽车	0.156	0.166	0.998	2.368	0.830	0.288	0.014	0.128

表 3 2012 年西安市机动车排放清单
Table 3 Vehicle emission inventory for Xi'an in 2012

项目	PM _{2.5}	PM ₁₀	NO _x	THC	CO	VOCs	NH ₃	SO ₂
小型客车	215.85	543.61	6 907.55	5 149.61	98 606.59	4 766.47	325.98	590.03
中型客车	36.60	49.28	871.52	332.03	3 999.46	321.11	11.45	30.49
大型客车	222.48	272.50	6 711.24	1 071.67	20 051.48	772.03	18.99	184.09
轻型货车	153.65	234.29	4 203.87	1 241.83	19 849.16	1 168.77	62.14	211.73
中型货车	478.70	592.38	9 365.98	1 746.48	30 030.05	1 719.97	30.87	342.58
重型货车	508.07	679.40	10 461.47	1 172.46	11 472.42	1 144.55	43.97	498.71
摩托车	33.70	40.48	777.24	5 023.35	31 805.33	4 904.24	24.29	30.56
低速汽车	241.43	256.95	1 548.88	3 675.87	1 288.55	447.72	22.07	199.31
合计	1 890.48	2 668.89	40 847.75	19 413.30	217 103.04	15 244.86	539.76	2 087.50

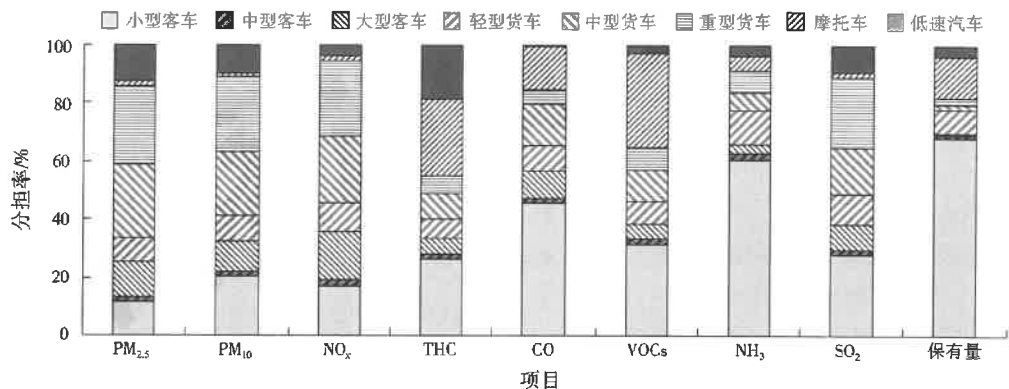


图 1 不同车型的机动车排放和保有量分担率

Fig.1 Contribution rates of vehicle emission and ownership for different vehicle types

2011)和《车用柴油》(GB 19147—2009)输入,气象数据由陕西省气象局提供;匝道比例以及检测/维护(I/M)制度参数则采用 MOVES 模型默认值。

2 结果与分析

2.1 排放因子

利用 MOVES 模型模拟得到载客汽车、载货汽车和摩托车共 7 种车型的排放因子;对于低速汽车,由于 MOVES 模型中无法找到与之相匹配的车型,因此低速汽车的排放因子参考文献[22]和轻型柴油货车模拟值来确定。各车型机动车的排放因子见表 2。由表 2 可以看出,中型和重型货车的 PM_{2.5}、PM₁₀、NO_x 和 SO₂ 排放因子较高,主要是由于这两类机动车大部分使用柴油作为燃料。摩托车的 THC、CO 和 VOCs 排放因子最高,目前我国关注较多的是载客汽

车和载货汽车的排放控制,因此建议后续对摩托车的排放控制给予更多的重视。

2.2 排放清单

西安市 2012 年的机动车排放清单见表 3。由表 3 可以看出,2012 年机动车排放的污染物总量分别为 PM_{2.5} 1 890.48 t、PM₁₀ 2 668.89 t、NO_x 40 847.75 t、THC 19 413.30 t、CO 217 103.04 t、VOCs 15 244.86 t、NH₃ 539.76 t 和 SO₂ 2 087.50 t。其中,85.45%(质量分数,下同)的 PM_{2.5}、88.86%的 PM₁₀、94.31%的 NO_x、55.19%的 THC、84.76%的 CO、64.89%的 VOCs、91.41%的 NH₃ 和 88.99%的 SO₂ 由载客汽车和载货汽车排放。

2.3 排放分担率

2.3.1 车型的影响

不同车型的机动车排放和保有量分担率如图 1

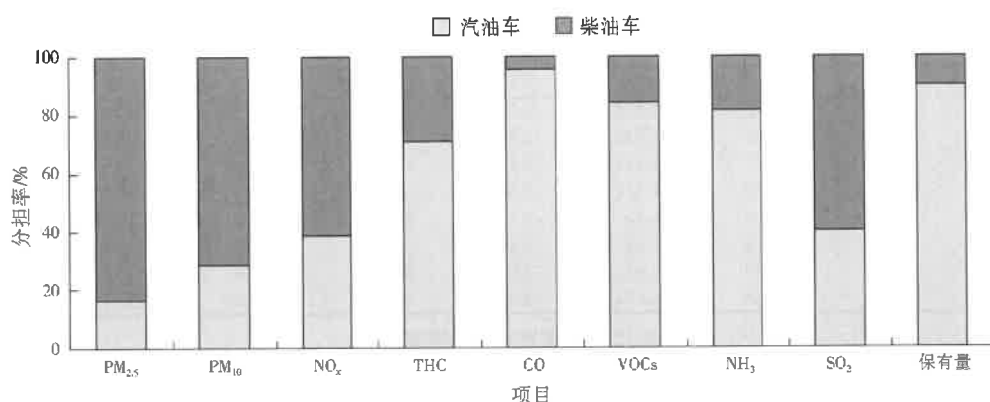


图 2 不同燃油类型的机动车排放和保有量分担率

Fig.2 Contribution rates of vehicle emission and ownership for different fuel types

所示。从图 1 可以看出：中型和重型货车是 PM_{2.5}、PM₁₀和 NO_x 的主要贡献者，两者的保有量总和仅占西安市机动车总保有量的 4.20%，却贡献了 52.20%的 PM_{2.5}、47.65%的 PM₁₀和 48.54%的 NO_x；小型客车和摩托车是 THC、CO 和 VOCs 的主要贡献者，两者的 THC、CO 和 VOCs 排放分担率总和分别为 52.40%、60.07%、63.44%；此外，小型客车对 NH₃的排放分担率最高，达到 60.39%；小型客车与重型货车对 SO₂的排放分担率均较高，两者总和为 52.16%。

2.3.2 燃油的影响

不同燃油类型的机动车排放分担率如图 2 所示（本研究仅考虑了汽油和柴油两大常规燃油）。从图 2 可以看出，柴油车对 PM_{2.5}、PM₁₀、NO_x 和 SO₂的排放分担率高于汽油车。柴油车的保有量比例仅为 10.23%，对 PM_{2.5}和 PM₁₀的排放分担率均超过了 70%。相比柴油车，汽油车对 THC、CO、VOCs 和 NH₃的排放分担率较高。

进一步选取载客汽车和载货汽车为研究对象，以 PM_{2.5}和 PM₁₀为污染物指标，分析不同燃油机动车的排放分担率，结果如图 3 所示。从图 3 可以看出，除了小型客车外，其余车型机动车中柴油车的 PM_{2.5}和 PM₁₀排放分担率均远高于汽油车，且中型和重型货车中柴油车的排放分担率超过了 90%。这主要是由于西安市 99%以上的小型客车为汽油车，其余车型机动车中均有超过 30%的柴油车，而柴油车的 PM_{2.5}和 PM₁₀排放因子远高于同车型的汽油车。

2.3.3 季节的影响

将 MOVES 模型输出的排放因子与行驶里程的月分布参数相结合，得到西安市不同季节的机动车排放分担率，结果如图 4 所示（春季为 3—5 月，夏

季为 6—8 月，秋季为 9—11 月，冬季为 1—2 月和 12 月）。从图 4 可以看出：各污染物中 CO 的排在冬季最多，其余污染物的排放均在夏季最多；总体上看，季节变化对机动车排放的影响较小。

2.4 不确定性分析

测算机动车排放清单需要采集的数据较多，各类数据的获取方法也不同。其中，机动车保有量和车型分布数据来自西安市历年的统计年鉴，不确定性较低。最终测算结果的不确定性主要来源于以下两个方面：

(1) 机动车活动水平：由于西安市机动车保有量很大，车型众多；本研究采用抽样的方法对主要车型的行驶里程进行了调查，无法覆盖的车型则通过参考相关文献获取。这与西安市各类机动车的实际使用状况存在一定误差，会导致不确定性增加。

(2) 机动车排放因子：本研究采用 MOVES 模型模拟来确定各类机动车的排放因子，并对机动车排放的主要影响参数进行了最大限度的本地化修正。但由于输入参数众多，部分获取难度较大的外围参数（如匝道比例）则采用了 MOVES 模型默认值，这也会导致不确定性增加。

3 结论

(1) 以 2012 年为基准年，利用 MOVES 模型模拟测算，得到西安市机动车排放的 PM_{2.5}、PM₁₀、NO_x、THC、CO、VOCs、NH₃ 和 SO₂ 分别为 1 890.48、2 668.89、40 847.75、19 413.30、217 103.04、15 244.86、539.76、2 087.50 t；其中载客汽车和载货汽车的排放分担率总和分别为 85.45%、88.86%、94.31%、55.19%、84.76%、64.89%、91.41%、88.99%。

(2) 不同车型机动车中，中型货车和重型货车

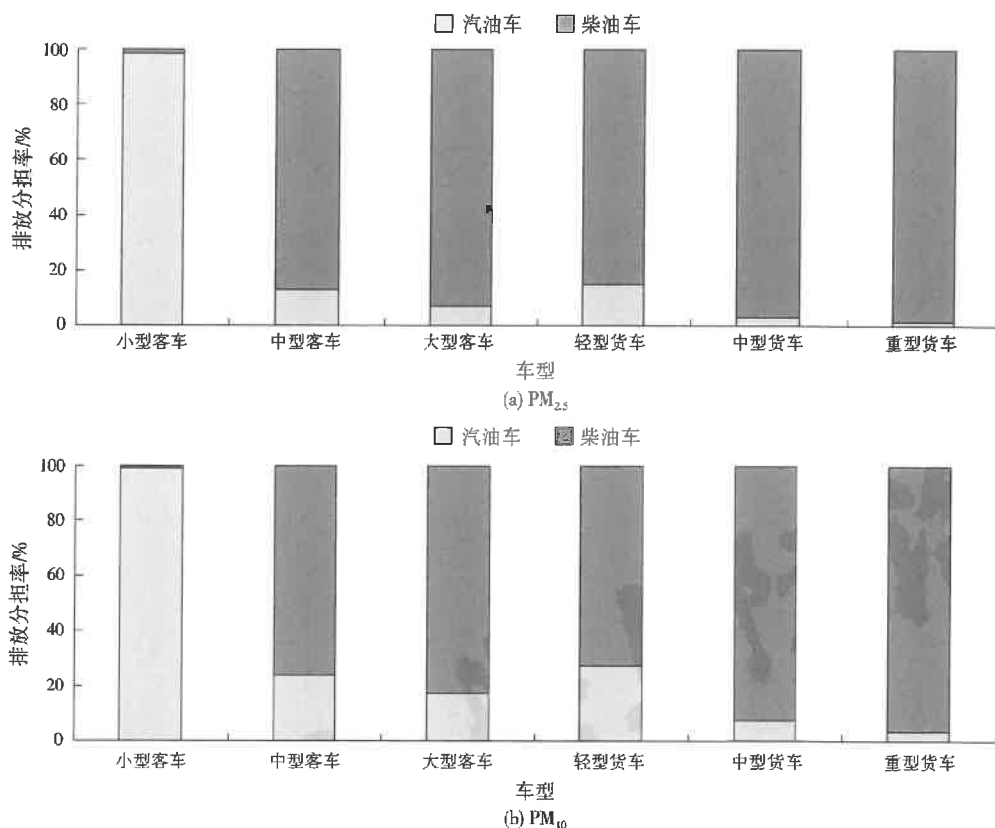


图3 载客汽车和载货汽车的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放分担率
Fig.3 Contribution rates of $PM_{2.5}$ and PM_{10} emissions for passenger car and truck

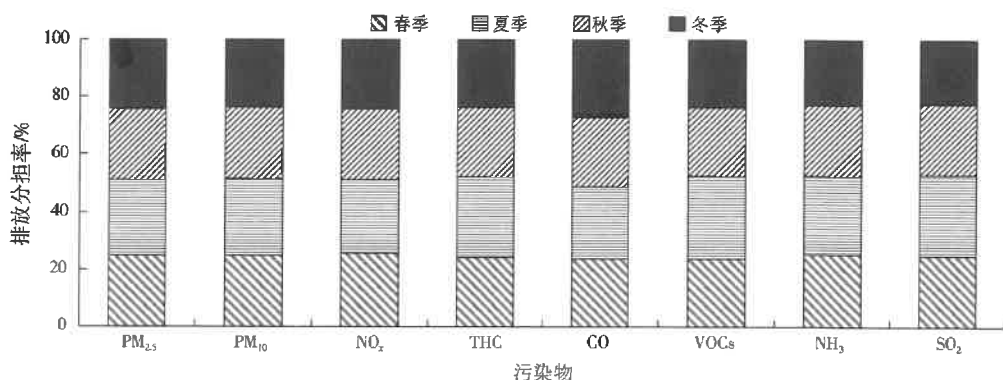


图4 不同季节的机动车排放分担率
Fig.4 Contribution rates of vehicle emission during different seasons

是 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 NO_x 的主要贡献者；小型客车和摩托车是 THC、CO 和 VOCs 的主要贡献者；小型客车是 NH_3 的主要贡献者，其与重型货车均为 SO_2 的主要贡献者。

(3) 不同燃油类型的机动车中，柴油车对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_x 和 SO_2 的排放分担率高于汽油车；而汽油车对 THC、CO、VOCs 和 NH_3 的排放分担率高于柴油车。其中，柴油车以 10.23% 的保有量比例却贡献了超过 70% 的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放。

(4) 西安市 4 个季节的机动车排放相差不大，CO 的排放在冬季最多，其余污染物的排放均在夏季最多。

参考文献：

- [1] YU Lingda, WANG Guangfu, ZHANG Renjian, et al. Characterization and source apportionment of $PM_{2.5}$ in an urban environment in Beijing [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2013, 13(2): 574-583.

(下转第 235 页)