

应用 PART5 模式计算机动车尾气管的颗粒物排放

吴烨, 郝吉明, 李伟, 傅立新(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要:采用修正的 PART5 模式获得了北京市机动车尾气管的颗粒物(PM₁₀和PM_{2.5})排放因子.在此基础上,计算了北京市1995和1998年机动车PM₁₀和PM_{2.5}的排放总量,并确定了分车型的排放分担率和颗粒物中各组分(铅、硫酸盐、可溶性有机物和残余碳等)的比例.结果表明,北京市机动车PM₁₀和PM_{2.5}的平均排放因子很高,其中汽油车、摩托车和重型柴油车的排放因子分别是美国同期水平的1.7~8.6倍、2.1~3.5倍和1.3~1.5倍.1995年北京市机动车尾气管排放的PM₁₀和PM_{2.5}分别为2445t和1890t,1998年则分别增至3359t和2694t,增加的幅度为37.4%和42.5%.

关键词:尾气管排放颗粒物;PM₁₀;PM_{2.5};机动车;排放因子;PART5模型;北京

中图分类号:X511 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2002)01-05-0006

Calculating Emissions of Exhaust Particulate Matter from Motor Vehicles with PART5 Model

Wu Ye, Hao Jiming, Li Wei, Fu Lixin(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China, E-mail: wuye98@mails.tsinghua.edu.cn)

Abstract: PART5, a vehicle particulate emission factor model developed by USEPA, was modified and then used to obtain the emission factors of exhaust PM₁₀ and PM_{2.5} from on-road automobiles, trucks and motorcycles in Beijing. The total exhaust PM₁₀ and PM_{2.5} emissions from motor vehicles in 1995 and 1998 were calculated separately. The contribution ratios of different types of vehicles to the total vehicular emissions, and the share of different exhaust particulate components including Pb, direct SO₄²⁻, soluble organic fraction (SOF) and remaining carbon portion (RCP), were also estimated. It was shown that the emission factors of exhaust PM₁₀ and PM_{2.5} from gasoline motor vehicles, motorcycles and heavy-duty diesel vehicles in Beijing were 1.7~8.6 times, 2.1~3.5 times and 1.3~1.5 times, respectively, of the USA average emission levels during the same period. The total exhaust PM₁₀ and PM_{2.5} from vehicles were 2445 tons and 1890 tons in 1995 in Beijing, and increased to 3359 tons and 2694 tons in 1998, which increase by 37.4% and 42.5%, respectively.

Key words: exhaust particulate matter; PM₁₀; PM_{2.5}; motor vehicles; emission factors; PART5 model; Beijing

90年代以来,随着北京市人口的增长和经济的发展,城市机动车保有量以年平均约17%的速度快速增长,截至1998年,北京市的机动车总保有量已经达到131万辆.机动车的排放已成为北京市细微颗粒物(PM_{2.5})的重要来源.城市机动车颗粒物的排放主要包括尾气管排放、轮胎磨损、刹车磨损、道路二次扬尘等等^[1],特别是尾气管排放和道路扬尘的协同作用,使得城市交通密集区域不论是粗颗粒的浓度或是细粒子的浓度都显著高于城市区域的平均浓度^[2,3].研究表明,机动车尾气管排放的大部分颗粒物粒径很小,主要为亚微米级的粒子^[4].由于这部分颗粒物可以深入人体肺泡内

部,因此,其环境浓度的增加将显著影响人体的肺功能并导致其它呼吸系统疾病的发生^[5,6].机动车尾气管颗粒物排放受控制技术、运行工况、油品质量等多种复杂因素的影响,一直是国外机动车排放污染及其控制的研究热点之一^[7],但国内研究尚不多见.本研究采用修正的PART5模式确定了北京市机动车尾气管PM₁₀和PM_{2.5}的排放因子.在此基础上,计算了北京市1995和1998年机动车PM₁₀和PM_{2.5}的排放总量,并确定了分车型的排放分担率

基金项目:国家重点基础研究项目(G1999045700)

作者简介:吴烨(1975~),男,博士研究生,主要研究方向为城市机动车排放污染及其控制.

收稿日期:2000-12-04;修订日期:2001-03-22

各重要化学组分的比例。

1 PART5 排放模式介绍^[8]

PART5 模式是由美国环保局开发的计算道路机动车颗粒物排放因子的数学模型,它根据多年来对大量车辆测试数据的分析回归,得到计算机动车颗粒物排放因子的经验公式。分析所用的数据来源为美国环保局组织的各种不同在用车排放水平测试结果,以及联邦测试程序(Federal Test Procedure, FTP)中测得的排放结果。该模式建构的思路和美国环保局用于计算机动车气态污染物排放因子的 MOBILE5 模式基本一致^[9,10]。

PART5 模式根据发动机的类型以及车辆的重量将机动车分为 12 类,对不同类型的车辆分别考虑油品质量、车速、维修保养状况等各种因素对排放的影响,并从这些数据的测试分析中获得各年、各车型车辆排放因子的平均水平,以及颗粒物中各重要化学组分(铅、硫酸盐、可溶性有机物和残余碳等)的组成比例。对每类机动车,其综合排放因子的基本计算公式可通过式(1)计算:

$$EFCOMP_v = \sum_{m=1}^{25} EF_{m,v} \cdot TF_{m,v} \quad (1)$$

其中, $EFCOMP_v$ 为 v 类机动车的综合排放因子(g/km); $EF_{m,v}$ 为车龄 m 年的 v 类机动车的排放因子(g/km); $TF_{m,v}$ 为车龄 m 年的 v 类机动车的行驶里程在该类机动车总行驶里程中所占的比例。影响 $EF_{m,v}$ 的因素很多,模式通过测试的结果,回归出经验公式进行计算。其表达式可以由包含下述各项参数的回归方程表述:

$$EF_{m,v} = f(V, C_s, C_{Pb}, FQ, FE, PS, CA, IM) \quad (2)$$

其中, V 为速度修正参数; C_s 为油品的含硫量参数; C_{Pb} 为油品的含铅量参数; FQ 为油品的其它影响参数; FE 为燃油经济性参数; PS 为颗粒物的粒径分布参数; CA 为机动车安装催化转化装置的比例参数; IM 为机动车维修保养状况影响参数。

PART5 根据美国的实际情况,确定了机动车控制技术水平、行驶里程、车辆登记分布、油

品质量等参数值。因此,当模式应用于中国的城市时,必须根据各城市的实际情况对这些参数进行相应的调整,以保证计算的准确性。

2 模式参数修正

2.1 机动车排放控制技术水平

机动车的排放控制水平是影响机动车颗粒物排放因子的最重要因素。根据我国和美国的机动车污染控制历程的调查分析,我国的轻型机动车整体水平处于加装尾气净化装置的条件已经具备,但尚未进行安装的阶段,这一污染控制水平相当于美国 70 年代初、中期的水平;而重型汽油发动机除少量 1994 年后生产的外,大部分处于无控状态,基本等同于美国 60 年代末、70 年代初的水平。1994 年开始的“中国机动车排放污染控制研究”(世界银行援助项目 B-9-3)对 171 辆在用机动车和重型发动机进行了实验室工况测试,测试的结果对应于美国的控制技术水平,也得到了类似的结论^[11]。中美在用机动车排放控制状况对应水平见表 1。

表 1 中国在用机动车排放状况对应于美国的控制水平

Table 1 Comparison of vehicle emission control levels between China and USA

车型	对应美国技术年代	车型	对应美国技术年代
轿车	1969 ~ 1971	重型汽油车	1970
轻型车	1974 ~ 1978	重型柴油车 ¹⁾	1970
中型车	1971 ~ 1974	摩托车	1985 ~ 1988

1) 假设我国重型柴油车的控制水平同重型汽油车相同

2.2 机动车登记分布和里程分布

机动车登记分布和里程分布反映了目前在用机动车的保有和使用状况,它的确定主要通过实际调研北京市的保有量数据和行驶里程数据获得。

(1) 年代登记分布 车辆的年代登记分布指正在运行的机动车中不同登记年代的车辆所占的比例。可通过下式表示:

$$V_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^{15} R_i} \quad (3)$$

其中, i 为年代; R_i 为 i 年份车辆登记数,可通过式(4)计算: $R_i = P_i - P_{i-1} + R_{i-15}$ (4) 其中, P_i 为 i 年份的机动车保有量。根据对北京

市机动车保有构成情况的调查,可假定机动车的淘汰年限为 15 年^[12].

(2) 里程分布 车辆的里程分布定义为车辆在不同车龄时行驶的里程数,即车辆的年累积里程增长率.本研究通过对北京市各主要机动车检测厂进行调研,将获得的不同车型车辆的车龄和行驶里程进行回归,进而得到机动车不同使用年份的行驶里程分布^[12].

2.3 机动车油品各项参数的修正

尽管我国机动车的总体排放控制仅相当于美国 70 年代的水平,但影响机动车颗粒物排放因子的另一重要因素(油品的质量)却要相对好得多.目前,我国车用汽油和柴油的含铅量和含硫量水平基本处于美国 80~90 年代的水平.

90 年代中期以来我国开始加快汽油无铅化的进程,1995 年我国车用汽油的平均含铅量约为 0.027g/L^[13],1997 年下半年开始,北京市全面禁止含铅汽油的销售^[14],要求汽油的含铅量低于 0.013g/L.对北京市车用汽油的调查表明,1998 年无铅汽油的平均含铅量已降至 0.005g/L 左右.目前,我国对车用汽油的含硫量要求是不高于 0.08%,但我国车用汽油的实际含硫量远低于该限值.1997 年,我国 90 号汽油(该标号汽油约占汽油市场份额的 60%左右)的平均含硫量约为 0.03%左右^[13].因此,本研究取 0.03%为北京市车用汽油的实际含硫量.我国的车用柴油主要是优质的轻柴油,轻柴油标准(GB252-94)对含硫量的要求是不高于 0.2%^[15].1994 年对我国车用柴油质量的调查表明,华北地区车用柴油的平均含硫量约为 0.058%左右,远低于标准限值.因此,本研究取 0.058%为北京市车用柴油的实际含硫量.车用柴油中不含铅.

2.4 其它参数输入

除上述重要参数的修正外,PART5 还要求输入一些参数,如机动车平均行驶速度、检查维护状况(I/M)等等.这些参数的确定均根据北京市实际调查的结果得到^[12].

3 计算结果与讨论

3.1 北京市机动车尾气管颗粒物排放因子

根据上述的参数修正,输入模式计算,得到北京市 1995 年和 1998 年机动车尾气管 PM10 和 PM2.5 排放因子,见表 2.美国同期的机动车尾气管颗粒物的排放水平见表 3.

表 2 北京市机动车尾气管颗粒物排放因子¹⁾/g·km⁻¹

Table 2 Exhaust particulate matter emission factors from various types of vehicles in Beijing							
年份	粒子	轿车	轻型汽油车	中型汽油车	重型汽油车	摩托车	重型柴油车
1995	PM10	0.057	0.038	0.143	0.158	0.043	0.773
	PM2.5	0.039	0.027	0.099	0.110	0.030	0.706
1998	PM10	0.023	0.025	0.139	0.152	0.027	0.785
	PM2.5	0.017	0.018	0.097	0.106	0.020	0.716

1) 车速为 23km/h,该车速为北京市昼间城区平均车速.

结果表明,北京市机动车 PM10 和 PM2.5 的平均排放因子很高.汽油车(包括轿车、轻型汽油车、中型汽油车和重型汽油车)、摩托车和重型柴油车的排放因子分别是美国同期水平的 1.7~8.6 倍、2.1~3.5 倍和 1.3~1.5 倍.其中轿车和中型汽油车的排放水平差距最大,与美国同期水平相比,排放因子分别高 2.1~6.5 倍和 5.3~8.6 倍.

表 3 同期美国机动车尾气管颗粒物排放因子¹⁾/g·km⁻¹

Table 3 Exhaust particulate matter emission factors from various types of vehicles in USA							
年份	粒子	轿车	轻型汽油车	中型汽油车	重型汽油车	摩托车	重型柴油车 ²⁾
1995	PM10	0.009	0.011	0.023	0.091	0.013	0.607
	PM2.5	0.008	0.011	0.019	0.066	0.009	0.553
1998	PM10	0.008	0.011	0.016	0.076	0.013	0.538
	PM2.5	0.008	0.010	0.014	0.056	0.009	0.491

1) 为便于比较,假定车速也为 23km/h 2) 与北京重型柴油车类似的载重级别.

3.2 机动车尾气管颗粒物排放量

根据北京市分车型的保有量和年均行驶里程,以及前面得到的各车型平均排放因子,即可求得机动车尾气管颗粒物的总排放量.计算公式见(5).

$$EQ = \sum_{v=1}^6 (EF_{COMP_v} \times P_v \times M_v) \quad (5)$$

其中,EQ 为尾气管颗粒物的排放量(t);P_v 为计算年份 v 类机动车的保有量;M_v 为计算年份

v 类机动车的年均行驶里程(km)。

计算得到的北京市机动车尾气管 P M I 0 和 P M 2. 5 的排放量见表 4。结果表明,1995 年北京市机动车尾气管排放的 P M I 0 和 P M 2. 5 分别为 2445t 和 1890t,1998 年则分别增至 3359t 和 2694t,增加的幅度为 37. 4 %和 42. 5 %。并

且,其增加量主要来自于重型柴油车颗粒物排放的大幅增加。从表 4 还可看出,机动车尾气管颗粒物排放主要由细微颗粒物(P M 2. 5)组成。1995 年,北京市机动车尾气管 P M 2. 5 排放占 P M I 0 排放的 77. 3 %;而到了 1998 年,这一比例上升到了 80. 2 %。

表 4 北京市机动车尾气管颗粒物排放量/t

Table 4 Total exhaust particulate matter emissions from various types of vehicles in Beijing								
年份	粒子	轿车	轻型汽油车	中型汽油车	重型汽油车	摩托车	重型柴油车	总计
1995	P M I 0	394. 5	274. 1	608. 8	186. 5	97. 7	883. 6	2445. 1
	P M 2. 5	270. 9	192. 6	422. 3	130. 6	68. 1	806. 0	1890. 4
1998	P M I 0	284. 7	251. 3	999. 4	227. 0	76. 4	1520. 7	3359. 4
	P M 2. 5	212. 0	184. 1	696. 0	158. 4	56. 6	1387. 0	2694. 2

3. 3 机动车分车型排放分担率分析

不同车型的车辆由于排放因子、行驶里程、保有量等特征参数的不同,其在机动车污染物

排放量中所占的份额会有显著的差异。计算得到的 1995 年和 1998 年北京市机动车分车型尾气管 P M 2. 5 的排放分担率见图 1。

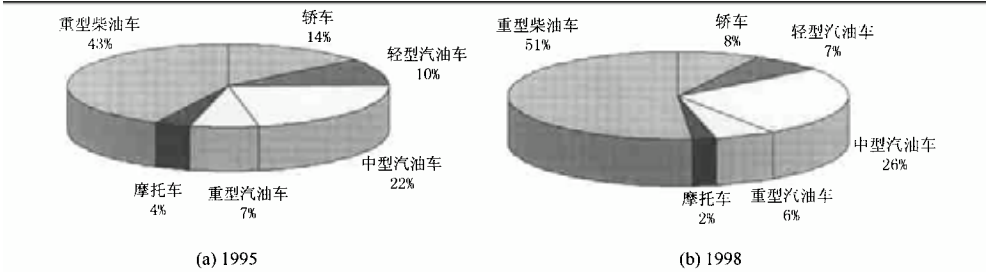


图 1 1995 和 1998 年北京市机动车分车型尾气管 P M 2. 5 的排放分担率

Fig. 1 Contribution ratios of different types of vehicles to total exhaust P M 2. 5 emissions in Beijing in 1995 and 1998

结果表明,不同车型对尾气管 P M 2. 5 排放的贡献水平差别较大。重型柴油车排放占到 P M 2. 5 总排放的一半左右,这主要是与重型柴油车颗粒物的排放因子很高(是其它车型的几倍到几十倍)的事实相对应的。而且随着重型柴油车保有量在近几年中增加较快,导致其分担率有明显上升(从 1995 年的 43 %上升到 1998 年的 51 %)。其次,中型汽油车也是重要的贡献源,占了约 1/4 的份额。因此,对于北京市机动车 P M 2. 5 排放的控制,应以控制重型柴油车辆为主,同时兼顾中型汽油车。

3. 4 机动车尾气管颗粒物排放各组分的比例

通过 PART5 模式,还可获得尾气管颗粒物中各种重要化学组分,例如铅(Pb)、硫酸盐(SO₄²⁻)、可溶性有机物(Soluble Organic Frac-

tion, SOF) 和残余碳(Re maining Carbon Portion, RCP)的组成比例。计算得到的 1995 年和 1998 年北京市机动车尾气管 P M 2. 5 排放的各组分担率见图 2。

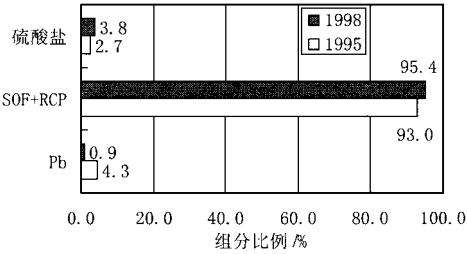


图 2 1995 年和 1998 年北京市机动车尾气管 P M 2. 5 排放的各组分担率

Fig. 2 Share of different exhaust particulate components to total exhaust P M 2. 5 emissions in Beijing in 1995 and 1998

结果表明,机动车尾气管排放的颗粒物中绝大多数为可溶性有机物和残余碳,铅和硫酸盐的比例很低.尤其在1998年北京市的汽油实现无铅化后,机动车排放的 $PM_{2.5}$ 中铅的比例大幅度下降,在总量中已不足1%.

4 结论和建议

通过修正的模式对北京市机动车尾气管颗粒物的排放因子计算结果表明,北京市机动车 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的平均排放因子很高.汽油车、摩托车和重型柴油车的排放因子分别是美国同期水平的1.7~8.6倍、2.1~3.5倍和1.3~1.5倍.从计算的排放因子可看出,机动车尾气管颗粒物排放主要由细微颗粒物($PM_{2.5}$)组成.

1995年北京市机动车尾气管排放的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 分别为2445t和1890t,1998年则分别增至3359t和2694t,增加的幅度为37.4%和42.5%.由于今后一段时期内北京市的机动车保有量还将保持快速增长,因此,需要采取更先进的技术以控制机动车的颗粒物排放.

不同车型对尾气管 $PM_{2.5}$ 排放的贡献水平差别较大.重型柴油车排放占到 $PM_{2.5}$ 总排放的一半左右.其次,中型汽油车也是重要的贡献源,占了约1/4的份额.因此,对于北京市机动车 $PM_{2.5}$ 排放的控制,应以控制重型柴油车辆为主,同时兼顾中型汽油车.

机动车尾气管排放的颗粒物中绝大多数为可溶性有机物和残余碳,铅和硫酸盐的比例很低.1998年北京市实现汽油无铅化后,机动车排放的 $PM_{2.5}$ 中铅的比例已不足1%.

为进行机动车污染控制,应进一步全面地定量分析影响机动车颗粒物排放的各种因素,通过采取措施调整这些因素向有利于减少排放的方向发展.

参考文献:

- 1 Lamoree D P, Turner J R. PM emissions emanating from limited-access highways. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1999, **49**(Special issue): 85~94.
- 2 Janssen N A H, Van Mansom D F M, Van Der Jagt K,

- Harssema H, Hoek G. Mass concentration and elemental composition of airborne particulate matter at street and background locations. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(8): 1185~1193.
- 3 Horvath H, Habenreich T A, Kreiner I, Norek C. Temporal and spatial variations of the Vienna aerosol. *Science of Total Environment*, 1989, **83**: 127~159.
- 4 Hitchins J, Morawska L, Wolff R, Gilbert D. Concentrations of submicrometre particles from vehicle emissions near a major road. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(1): 51~59.
- 5 Nitta H, Sato T, Nakai S, Maeda K, Aoki S, Ono M. Respiratory health associated with exposure to automobile exhaust. I. Results of cross-sectional studies in 1979, 1982, and 1983. *Archives of Environmental Health*, 1993, **48**: 53~58.
- 6 Oosterlee A, Drijver M, Lebreit E, Brunekreef B. Chronic respiratory symptoms in children and adults living along streets with high traffic density. *Occupational and Environmental Medicine*, 1996, **53**: 241~247.
- 7 Cadle S H, Gorse R A, Belian T C, Lawson D R. Real-world vehicle emissions: a summary of the eighth coordinating research council on road vehicle emissions workshop. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1999, **49**: 242~255.
- 8 US Environmental Protection Agency. Draft user's guide to PART5: a program for calculating particle emissions from motor vehicles. EPA-AA-AQAB-94-2, 1995.
- 9 傅立新,贺克斌,何东全,唐仲洲,郝吉明. MOBILE汽车源排放因子模式研究. *环境科学学报*, 1997, **17**(4): 474~479.
- 10 何东全,郝吉明,贺克斌,傅立新. 应用模式计算机动车排放因子. *环境科学*, 1998, **19**(3): 7~10.
- 11 Hao Jiming, He Dongquan, Wu Ye, Fu Lixin, He Kebin. A study of the emission and concentration distribution of vehicular pollutants in the urban area of Beijing. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(3): 453~465.
- 12 郝吉明,傅立新,贺克斌,吴烽编著. 城市机动车排放污染控制——国际经验分析与中国的研究成果. 北京: 中国环境科学出版社, 2000. 136~138.
- 13 王飞. 我国车用汽油质量现状及发展趋势. *石油商技*, 1999, **17**(4): 27~30.
- 14 国家统计局. 98中国环境统计. 北京: 中国统计出版社, 1999. 224~230.
- 15 中国标准出版社编. 中国强制性国家标准汇编 石油化工卷1(第二版). 北京: 中国标准出版社, 1998. 31~38.