

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0523

严晗, 吴焯, 张少君, 等. 2014. 北京典型道路交通环境机动车黑碳排放与浓度特征研究[J]. 环境科学学报, 34(8): 1891-1899

Yan H, Wu Y, Zhang S J, et al. 2014. Emission characteristics and concentrations of vehicular black carbon in a typical freeway traffic environment of Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(8): 1891-1899

北京典型道路交通环境机动车黑碳排放与浓度特征研究

严晗¹, 吴焯^{1, 2, *}, 张少君¹, 宋少洁^{1, 3}, 傅立新^{1, 2}, 郝吉明^{1, 2}

1. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家联合重点实验室, 北京 100084

2. 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室, 北京 100084

3. 麻省理工学院地球大气与行星科学系, 马塞诸塞州, 美国

收稿日期: 2013-10-11

录用日期: 2013-11-18

摘要:本研究对 2009 年北京市典型道路(北四环中路西段)进行实际交通流监测和调研,分析了总车流量、车型构成和平均速度的日变化规律.应用北京机动车排放因子模型(EMBEV 模型)和颗粒物黑碳排放的研究数据,计算该路段的黑碳平均排放因子和排放强度.根据同期观测的气象数据,应用 AERMOD 模型对道路黑碳排放进行了扩散模拟,并根据城市背景站点和道路边站点的监测数据对模拟结果进行了验证.研究表明,该路段黑碳平均排放因子与重型柴油车在总车流中所占比例呈现出极强的相关性,由于北京市实行货车区域限行制度,日间时段总车流的平均黑碳排放因子为 $(9.3 \pm 1.2) \text{ mg} \cdot \text{ km}^{-1} \cdot \text{ veh}^{-1}$, 而夜间时段上升至 $(29.5 \pm 11.1) \text{ mg} \cdot \text{ km}^{-1} \cdot \text{ veh}^{-1}$. 全天时均黑碳排放强度为 $17.9 \sim 115.3 \text{ g} \cdot \text{ km}^{-1} \cdot \text{ h}^{-1}$, 其中早(7:00—9:00)晚(17:00—19:00)高峰时段的黑碳排放强度分别为 $(106.1 \pm 13.0) \text{ g} \cdot \text{ km}^{-1} \cdot \text{ h}^{-1}$ 和 $(102.6 \pm 6.2) \text{ g} \cdot \text{ km}^{-1} \cdot \text{ h}^{-1}$. 基于同期监测数据验证, AERMOD 模型的模拟效果较好.模拟时段的道路黑碳排放对道路边监测点的平均浓度贡献为 $(2.8 \pm 3.5) \mu\text{g} \cdot \text{ m}^{-3}$. 由于局地气象条件差异,日间和夜间的机动车排放对道路边黑碳的模拟浓度存在显著差异.日间时段,小型客车排放对道路边站点的黑碳浓度贡献最高,达 $(1.07 \pm 1.57) \mu\text{g} \cdot \text{ m}^{-3}$; 其次为公交车,达 $(0.58 \pm 0.85) \mu\text{g} \cdot \text{ m}^{-3}$. 夜间时段货车比例明显上升,其黑碳排放占主导地位,贡献浓度 $(2.44 \pm 2.31) \mu\text{g} \cdot \text{ m}^{-3}$.

关键词:黑碳; 交通流; 机动车; 排放因子; AERMOD 模型

文章编号: 0253-2468(2014)08-1891-09

中图分类号: X51

文献标识码: A

Emission characteristics and concentrations of vehicular black carbon in a typical freeway traffic environment of Beijing

YAN Han¹, WU Ye^{1, 2, *}, ZHANG Shaojun¹, SONG Shaojie^{1, 3}, FU Lixin^{1, 2}, HAO Jiming^{1, 2}

1. School of Environment, State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Tsinghua University, Beijing 100084

2. State Environmental Protection Key Laboratory of Source and Control of Air Pollution Complex, Beijing 100084

3. Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, U.S.

Received 11 October 2013;

accepted 18 November 2013

Abstract: Traffic flow data, including hourly profiles for total traffic volume, fleet composition by vehicle category and average speed, were investigated on a typical freeway (the North Fourth Ring Road) in Beijing during 2009. By applying the Emission Factor Model for Beijing Vehicle Fleet (EMBEV) in combination with previous studies on vehicle emissions of black carbon (BC), we estimated BC emission factors and emission intensity from on-road vehicles. In combination with simultaneously measured meteorological data in Beijing, dispersion of road traffic BC emissions was simulated with the AERMOD model in a roadside environment and further validated with concurrently observed BC concentration data. Our results showed that the hourly average BC emission factor was very strongly correlated with the proportion of the traffic volume of heavy-duty diesel vehicles (e.g., diesel-powered

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.51322804, 51378225); 新世纪优秀人才支持计划(No.NCET-13-0332); 国家高科技研究发展计划(863 计划)(No.2013AA065303)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51322804, 51378285), the Program for New Century Excellent Talents in University (No. NCET-13-0332) and the National High Technology Research and Development Program (863) of China (No. 2013AA065303)

作者简介: 严晗(1988—), 女, E-mail: yanhan06@gmail.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: ywu@tsinghua.edu.cn

Biography: YAN Han(1988—), female, E-mail: yanhan06@gmail.com; * **Corresponding author**, E-mail: ywu@tsinghua.edu.cn

passenger buses and freight trucks). Due to the traffic restrictions on truck use in the urban area of Beijing during the day time (6 a.m. to 11 p.m.), the average BC emission factor was $(9.3 \pm 1.2) \text{ mg} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{veh}^{-1}$ during the day but increased to $(29.5 \pm 11.1) \text{ mg} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{veh}^{-1}$ during night time. On the other hand, BC hourly emission intensity ranged from $17.9 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ to $115.3 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ for this road segment. Two peaks of BC emission intensity were observed synchronized with traffic volume peaks, $(106.1 \pm 13.0) \text{ g} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ during the morning rush period (7:00—9:00) and $(102.6 \pm 6.2) \text{ g} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ during the evening rush period (17:00—19:00). The AERMOD was able to provide satisfactory simulation results of BC concentration at the road side due to traffic emissions as validated by observed concentration data. Road traffic emissions were estimated to contribute $(2.8 \pm 3.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ BC on average at the road side with the AERMOD model. In particular, due to the great differences of local meteorological conditions, substantial seasonal and diurnal variations were observed from the simulated BC concentrations. During the day, light-duty passenger cars were the largest contributor $(1.07 \pm 1.57 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ among all vehicle categories, followed by the public bus fleet $(0.58 \pm 0.85 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$. During night time, trucks became the dominant contributor $(2.44 \pm 2.31 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ to BC concentration at the road site.

Keywords: black carbon; traffic flow; vehicle; emission factor; AERMOD

1 引言(Introduction)

随着社会经济的发展与城市化进程的深化,中国机动车保有量快速上升.机动车排放成为城市空气污染的主要来源之一,“煤烟-机动车混合型”大气复合污染特征日益显著(Wang *et al.*, 2010; Wang and Hao, 2012).例如,根据环保部公布的数据,2011年全国机动车氮氧化物排放总量达到637.6万t,占全国排放总量的26.5%(中国机动车污染防治年报, 2012).北京、上海和广州等特大城市的机动车氮氧化物排放贡献率则更高,达到40%以上(Wang *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2013; Fu *et al.*, 2013).为了控制机动车排放,北京市除了采取加严新车排放标准、改善燃油品质、强化维护/保养制度等传统排放控制措施,也采取了一系列严格的交通管控措施,包括摩托车和黄标车的区域限行、机动车尾号限行和小客车摇号上牌等(Wu *et al.*, 2012; 孔茜等, 2010).这些交通管控措施不仅能够改善路面道路车流构成和运行状况,对北京市区的机动车排放控制也能起到一定的作用(Wu *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2010; 宋少洁等, 2012).

在大气PM_{2.5}各化学组分中,黑碳(black carbon, BC)是化石燃料含碳物质不完全燃烧的产物,被认为对气候变化和人体健康具有显著影响(Jacobson, 2002; Schwartz *et al.*, 2008; Bond *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2014).城市机动车颗粒物排放具有低空特征,对城市人群的健康影响更为显著(Du *et al.*, 2011, 2013).此外,交通排放还被认为是黑碳排放的重要贡献者,特别是来自于柴油发动机的排放贡献(Bond, 2007; 唐杨等, 2013).需要指出的是,以往对交通源黑碳的研究主要是基于平均排放因子的宏观清单方式,缺乏对包括车流量、车型构成和运行工况在内的道路交通流特征的关注.北京市

所采取交通管控措施会对道路的交通流特征产生影响,从而对道路机动车黑碳排放特征和交通环境黑碳浓度产生影响.目前,基于实际道路交通流特征的机动车黑碳排放和浓度变化尚缺乏深入研究.

因此,本研究选取北京市北四环西路中段为研究对象,对道路典型交通流特征进行了调研分析,建立了基于交通流特征的机动车黑碳排放量与排放强度的计算方法.通过应用空气质量模型,对交通环境中的黑碳浓度进行模拟,并以同期监测数据进行验证,分析了交通环境黑碳浓度的机动车贡献日变化规律和不同时段的分车型浓度贡献率.

2 研究方法与数据来源(Methods and data sources)

2.1 数据监测概况

2.1.1 典型路段交通流监测 本研究的交通流监测路段为北四环中路(展春二桥至学院桥段),见图1.该监测路段共12条车道(含辅路),主辅路总宽约36m,长约1000m.选取2009年8月(夏季)和2009年12月(冬季)的典型工作日进行全天24h车流采样监测.该路段的小时平均车速参考北京交通大学及北京交通发展研究中心所建立的北京市机动车排放动态信息库中提供的该年份路段主辅路时均速度(北京交通大学等, 2010).结果显示(图2),监测路段的总车流量日分布规律冬夏无明显差异,均呈现出显著的早晚高峰特征,高峰期间道路双向总车流量接近20000 veh·h⁻¹.此外,车流时均速度变化也较好地体现早晚高峰特征,路段高峰期的时均速度低于40 km·h⁻¹.基于本课题组对公交车实际道路速度采样研究结果,本研究设定公交车时均速度相对其他车辆低约25%,这是由于公交车在行驶过程中频繁停靠站导致怠速工况比例较高所造成的(Zhang *et al.*, 2014a).由于北京市采取了货车区域限行的措施,四环(含)内早6点到23点禁止载货汽车通行.如表1所示,日间(6:00—23:00)小客车

所占比例最高,占总车流量的 82.2%。夜间(23:00—次日 6:00)小客车所占比例有所降低,占总车流量的 59.5%;而中重型货车和轻型货车的构成比例显著升高,分别为 7.1%和 10.6%。

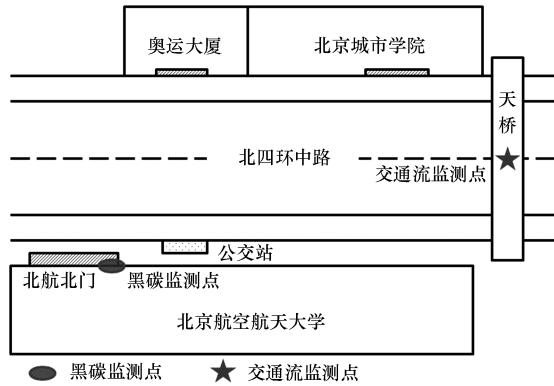


图 1 交通流监测点及道路边大气采样点位置示意图

Fig.1 Location of the monitoring sites for traffic flow and near-road air quality measurement

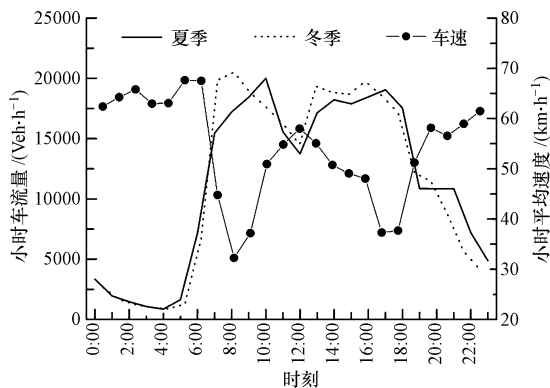


图 2 北四环中路西段的小时车流量和平均速度分布

Fig.2 Hourly traffic volume and average speed on the North Fourth Ring Road

表 1 北四环中路西段日间与夜间的车流车型构成

Table 1 Fleet composition by vehicle category during day time and night time

车型	车流车型构成	
	日间	夜间
小型客车	82.2%	59.5%
中型客车	0.5%	1.3%
大型客车	0.2%	0.6%
轻型货车	1.9%	10.6%
中重型货车	0.1%	7.1%
出租车	14.2%	20.7%
公交车	0.9%	0.2%

2.1.2 交通环境的黑碳浓度监测 道路边黑碳监

测时间段为 2009 年 8 月 4—7 日、10—14 日(夏季)和 2009 年 12 月 1—9 日(冬季),监测站点设在北四环南侧北京航空航天大学附近,距路段中心线 30 m,距离地面高 3 m,其地理位置如图 1 所示.此外,本研究还选取同期清华园监测点(距北四环监测点直线距离约 1.5 km)的黑碳浓度数据作为市区的平均浓度,用于模型模拟结果的验证.黑碳监测采用美国 Magee 公司生产的 AE-51 微型黑碳仪.测量原理为:将含有颗粒物的空气透过该监测仪的石英纤维滤膜,测量在透光面积处的光传输强度的变化.采样过程设定流量为 $50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,平均采样周期为 5 min.光传输强度的降低会导致衰减率的增加,但是,相关研究发现黑碳浓度和衰减率并不呈线性关系(Kirchstetter and Novakov, 2007; Weingartner *et al.*, 2003).本研究为了修正非线性关系,采用 Song *et al.* (2013)所推荐的修正经验公式对原始监测数据进行校正.

2.1.3 气象数据监测 本研究在开展空气质量监测以外,同步监测北京市区的气象数据.气象数据的监测采用 Vantage Pro 2 (VP2) 电子气象站,设定采样周期为 10 min.本研究中,VP2 电子气象站设置于清华园,并定期下载气象数据.所测量的数据包括大气压、干球温度、湿球温度、湿度、风速、风向和降雨量等指标.这些气象数据,将作为交通环境黑碳浓度模拟的输入条件被使用.

2.2 道路黑碳排放强度计算

2.2.1 机动车排放因子模型 本研究利用清华大学等单位开发的北京市机动车排放因子模型(EMBEV)计算了道路机动车排放因子与排放强度.EMBEV 模型可以根据燃油类型、车型规格和排放控制水平来模拟各类交通流特征下的车型排放因子,所模拟的污染物种类包括一氧化碳(CO)、总碳氢化合物(THC)、氮氧化物(NO_x)和 $\text{PM}_{2.5}$ (Zhang *et al.*, 2014b).EMBEV 模型的轻型车模块根据近 1500 辆轻型车台架测试结果确定北京典型工况下的基准排放因子,并根据实际运行条件(速度、道路类型、负载、温度、燃油品质和空调使用等参数)进行修正.重型车模块则根据近 150 辆重型车车载排放测试(PEMS)数据,基于“瞬态速度-机动车比功率”的微观工况划分方法确定各车型技术的污染物排放速率,并对实际运行过程的速度、燃油品质和负载系数进行修正.

2.2.2 道路黑碳排放强度计算 国内外对于机动

车黑碳排放强度有多种研究测试手段.例如, Wang *et al.* (2011) 利用跟车测试前车尾气排放烟羽中污染物浓度, 分析北京公交车黑碳排放因子. Kirchstetter *et al.* (1999) 和 Ban-Weiss *et al.* (2008) 基于隧道测试实验, 分析了轻型汽油车和中重型柴油货车的 $PM_{2.5}$ 和黑碳排放因子. Ban-Weiss *et al.* (2008) 还发现, 尽管 $PM_{2.5}$ 和黑碳的排放因子随着车辆技术发展而降低, 但 $PM_{2.5}$ 中黑碳所占比例相对稳定. Bond *et al.* (2007) 和 Song *et al.* (2012) 基于测试数据并根据能源使用强度建立交通源黑碳排

$$EF_h = 1000 \sum_{e,f,t} (VF_{h,t} TF_{e,f,t} EF_{PM_{e,f,t}}(v_{h,t}) W_{BCf}) \quad (1)$$

$$EI_h = \frac{EF_h TV_h}{1000} = TV_h \sum_{e,f,t} (VF_{h,t} TF_{e,f,t} EF_{PM_{e,f,t}}(v_{h,t}) W_{BCf}) \quad (2)$$

$$P_{h,t} = \frac{EI_{h,t}}{EI_h} = \frac{TV_h \sum_{e,f} (VF_{h,t} TF_{e,f,t} EF_{PM_{e,f,t}}(v_{h,t}) W_{BCf})}{EI_h} \times 100\% = \frac{\sum_{e,f} (VF_{h,t} TF_{e,f,t} EF_{PM_{e,f,t}}(v_{h,t}) W_{BCf})}{\sum_{e,f,t} (VF_{h,t} TF_{e,f,t} EF_{PM_{e,f,t}}(v_{h,t}) W_{BCf})} \times 100\% \quad (3)$$

式中, EF_h 为第 h 小时的机动车平均黑碳排放因子 ($mg \cdot km^{-1} \cdot veh^{-1}$); EI_h 为第 h 小时的道路黑碳排放强度 ($g \cdot km^{-1} \cdot h^{-1}$); $P_{h,t}$ 第 h 小时 t 车型的排放分担率; TV_h 为第 h 小时的总车流量 ($veh \cdot h^{-1}$); $EI_{h,t}$ 为第 h 小时 t 车型的道路黑碳排放强度 ($g \cdot km^{-1} \cdot h^{-1}$); $VF_{h,t}$ 为第 h 小时中车型 t 在道路总车流中所占比例; $TF_{e,f,t}$ 为车型 t 的车流中排放标准 e 和燃料类型 f 的车辆所占比例, 基于北京交通发展研究中心和北

放清单. 本研究综合考虑上述多位学者的研究成果及 EMBEV 模型结果, 根据典型工况的燃油经济性折算为里程排放因子(式(1)), 道路机动车排放强度见式(2), 小时平均分车型排放分担率计算公式见式(3), 并进一步确定了机动车 $PM_{2.5}$ 排放中黑碳所占的平均质量比例 (W_{BC}) (表2). 本研究对于轻型汽油车、重型柴油车和天然气车(如压缩天然气 CNG 公交车)的黑碳排放占 $PM_{2.5}$ 的质量比例分别取 32%、53% 和 21%.

京交通大学的交通流车辆技术分布研究结果(北京交通大学等, 2010) 确定本研究中所取的各车型技术分布比例 ($TF_{e,f,t}$); $EF_{PM_{e,f,t}}(v_{h,t})$ 为车型 t 、排放标准 e 和燃料类型 f 的车辆在时均速度 $v_{h,t}$ 下的 $PM_{2.5}$ 排放因子, $g \cdot km^{-1} \cdot veh^{-1}$, 利用 EMBEV 模型进行计算; W_{BCf} 为燃料类型 f 的车辆 $PM_{2.5}$ 排放中黑碳所占的质量比例.

表2 机动车 $PM_{2.5}$ 与黑碳排放因子

Table 2 Emission factors of $PM_{2.5}$ and black carbon for on-road vehicles

车型	$PM_{2.5}$ 排放因子/($mg \cdot km^{-1}$) $EF_{PM_{2.5}}$ /($mg \cdot km^{-1}$)	黑碳排放因子/($mg \cdot km^{-1}$) EF_{BC} /($mg \cdot km^{-1}$)	黑碳排放占 $PM_{2.5}$ 的质量比例 (W_{BC})
轻型汽油车	3.4; 6.7; 10.5; 25.5; 28(国4~国0) ¹⁾ 5.4~7.8 ²⁾	0.6; 1.2; 1.9; 3.6; 6.0(国4~国0) ⁵⁾ 3.8~12.1 ⁶⁾ 1.7~2.6 ²⁾	31% ²⁾ 33%±4% ⁸⁾
重型柴油车	货车 208; 180; 331; 1332(国3~国0) ¹⁾ 公交 104; 313; 816; 773(国4~国1) ¹⁾ 211; 197; 387; 482(国3~国0) ³⁾	119; 101; 225; 220(国3~国0) ³⁾ 68; 135; 241(国4~国2) ⁷⁾	46%~58% ³⁾ 51%~61% ²⁾ 51%±11% ⁸⁾
天然气车	115(国3) ¹⁾ 60(EEV) ⁴⁾	57(国3) ⁷⁾	21%±10% ⁹⁾

注: ¹⁾ EMBEV 模型模拟值, 其中设定轻型汽油车平均速度为 $25 km \cdot h^{-1}$, 重型柴油车为 $40 km \cdot h^{-1}$, 公交车为 $18 km \cdot h^{-1}$; ²⁾ Ban-Weiss *et al.*, 2008, 隧道测试; ³⁾ COPERT4 模型计算值, 设定货车平均速度为 $40 km \cdot h^{-1}$; ⁴⁾ Hallquist *et al.*, 2012, 遥感测试; ⁵⁾ Song *et al.*, 2012; ⁶⁾ Bond *et al.*, 2007; ⁷⁾ Wang *et al.*, 2011, 柴油公交车道路烟羽测试; ⁸⁾ Kirchstetter *et al.*, 1999, 隧道测试; ⁹⁾ Reynolds *et al.*, 2011, 四冲程 CNG 三轮车台架测试.

2.3 交通环境的黑碳扩散模拟

AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD) 是美国环保署最新开发和推荐使用的稳态烟羽模型, 用于城市和街区尺度的污染物扩散模拟 (USEPA, 2012).

AERMOD 模型基于污染物扩散统计理论, 假设在稳定边界层污染物的浓度分布在水平和垂直方向上服从高斯分布; 在对流边界层, 污染物浓度分布假设在水平方向上也服从高斯分布, 但在垂直方向上

则描述为一个双向高斯概率密度函数. AERMOD 模型采用 AERMET 模块和 AERMAP 模块分别对模拟所需的气象数据和地形数据进行预处理,并且考虑城市边界层和热岛效应等影响,使得模拟值更能体现局地气象因素的影响.近年来, AERMOD 也被用于模拟交通排放(Chen *et al.*, 2009; 薛佳平等, 2010; Misra *et al.*, 2013), Chen *et al.* (2009) 比较了 AERMOD、CALINE4 和 CAL3QHC 3 种模型对美国加州及英国伦敦典型道路 PM_{2.5} 浓度的模拟结果,认为 AERMOD 可以更为精准地模拟大气扩散的过程. Misra *et al.* (2013) 用点源处理多伦多市区某交通区域的排放,模拟结果显示对 CO 的模拟结果较好.

本研究应用 AERMOD 模型时,将北四环中路(展春二桥至学院桥段)处理为长方形面源,假设机动车每小时污染物的排放量平均分布于长 1000 m 宽 50 m 的长方形中.地表气象数据选取 2009 年 8 月 4 日—14 日、12 月 1 日—9 日清华气象站的数据,高空数据选取北京市气象局纪录的高空探测数据.由于选取的北四环路段为开阔、平坦的道路,不需要进行地形预处理.需要说明的是,由于道路黑碳监测点在道路南侧,因此南风(监测点在上风向)或风速很低的气象条件(如静稳天气)未在本研究考虑范围内.

在模拟道路边黑碳扩散时均浓度的基础上,本研究进一步分析不同时段典型车队对道路边监测点的黑碳浓度贡献,计算公式见式(4).

$$C_{h,t} = P_{h,t} \cdot C_h \quad (4)$$

式中, $C_{h,t}$ 为第 h 小时 t 车型的黑碳浓度贡献 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); $P_{h,t}$ 第 h 小时 t 车型的排放分担率,见公式(3); C_h 为第 h 小时道路边平均黑碳浓度贡献 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),为 AERMOD 模型模拟值.

3 结果(Results)

3.1 道路黑碳排放强度与排放因子

图 3 为根据冬季夏季平均交通流特征计算所得的机动车平均黑碳排放因子 (EF_h) 和排放强度 (EI_h) 的日变化规律.结果显示,黑碳平均排放因子与重型柴油车在总车流中所占比例呈现出极强的相关性 ($R^2 = 0.97$).由于北京城区实施了日间时段货车区域限行政策,日间重型柴油车在车队所占比例仅 2%~4% (主要为柴油公交车),总车流的平均黑碳排放因子为 $(5.8 \pm 0.7) \text{ mg} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{Veh}^{-1}$.夜间时段,货车(其中多数为重型柴油车)进入四环行驶,

重型柴油车比例上升到 $13\% \pm 5\%$,总车流的平均黑碳排放因子也相应上升为 $(18.3 \pm 6.4) \text{ mg} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{Veh}^{-1}$.

黑碳排放强度则呈现出与平均排放因子完全不同的日变化特征.本研究显示,北四环中路西段的机动车黑碳排放强度在冬夏季差异不大 ($\pm 5\%$ 以内),且具有明显的早高峰和晚高峰特征.全天时均黑碳排放强度为 $17.9 \sim 115.3 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.其中,早高峰时段(7:00—9:00)和晚高峰时段(17:00—19:00)的时均黑碳排放强度分别为 $(106.1 \pm 13.0) \text{ g} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $(102.6 \pm 6.2) \text{ g} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,约为全天各小时排放强度平均水平的 1.5 倍.尽管夜间的平均车流量仅为全天各小时平均水平的 18%,夜间黑碳排放强度却高达全天各小时平均水平的 43%,为 $(30.3 \pm 6.7) \text{ g} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

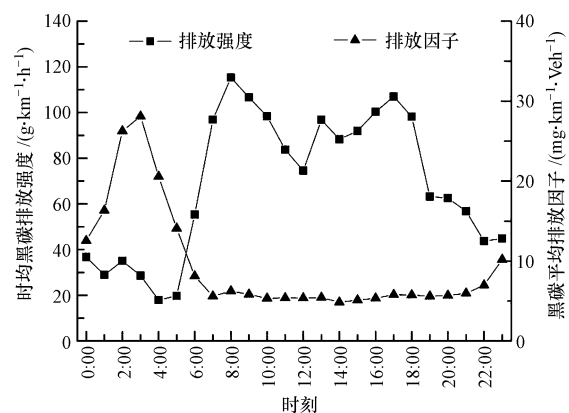


图 3 时均道路黑碳排放强度及单车平均排放因子

Fig.3 Hourly emission intensity and average emission factor of black carbon

3.2 交通环境黑碳浓度模拟与验证

图 4 为北四环中路西段道路边黑碳监测浓度,结果显示,道路边平均黑碳浓度为 $(14.1 \pm 9.5) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,其中夏季道路边平均黑碳浓度为 $(10.6 \pm 4.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,冬季为 $(17.5 \pm 11.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.夏季和冬季的道路边黑碳监测结果都呈现出日间浓度低、夜间浓度高的特征,并且冬季日夜的黑碳浓度差相对夏季更大.由于 2009 年 12 月已经进入采暖期,燃煤采暖是北京市冬季黑碳贡献重要的本地排放源(Song *et al.*, 2013),从而导致冬季采暖期黑碳背景浓度上升.结合上述道路边站点和城市背景站点的黑碳监测数据,本研究仅对模型夏季的模拟结果进行了验证.在 AERMOD 模拟时段中,城市背景站点和道路边的黑碳浓度分别为 $(8.4 \pm 1.2) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和

(11.3 ± 5.2) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 图 5 显示, 道路边黑碳浓度监测值与模拟值(城市背景点黑碳浓度与 AERMOD 模拟浓度之和)在 $[0.5, 2.0]$ 区间的比例为 92.7%, Pearson 相关系数为 0.51, 表明模拟浓度与监测浓度

有较好的相关性, AERMOD 的模拟效果较好. 道路边监测站点由机动车排放带来的黑碳平均贡献比例为 $18.6\% \pm 21.4\%$.

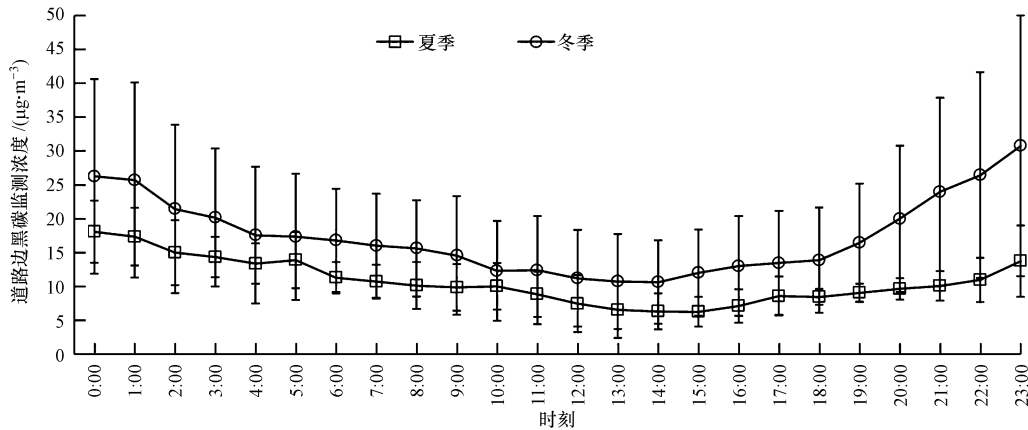


图 4 道路边黑碳监测时均浓度

Fig.4 Observed hourly roadside concentration of black carbon

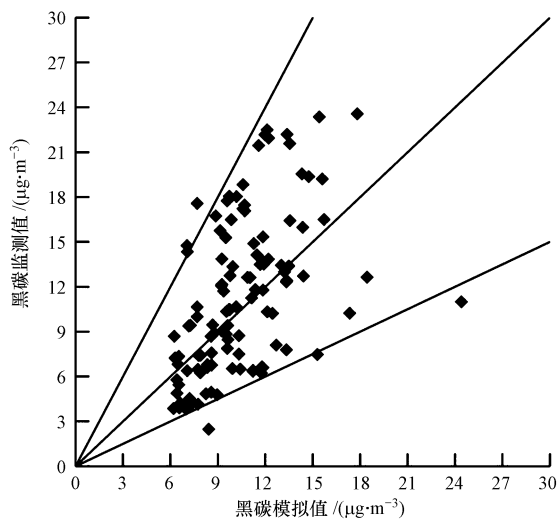


图 5 监测值与模拟值对比图

Fig.5 Comparisons between observed and simulated black carbon concentration at roadside

图 6 为利用 AERMOD 模型模拟的北四环中路西段的机动车黑碳排放对监测点的浓度贡献. 结果显示, 机动车黑碳排放对于道路边监测点的平均浓度贡献为 (2.8 ± 3.5) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 其中, 模拟时段的机动车黑碳排放贡献浓度为 (2.1 ± 2.4) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 且日间和夜间的浓度贡献差异较大. 尽管道路边的黑碳排放强度在夜间大幅下降, 但夜间机动车黑碳贡献浓度却由日间模拟时段的 (1.4 ± 2.6) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 上升至 (3.3 ± 1.4) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 这是由于夜间的气象条件不利

于污染物扩散造成的, 这与道路边黑碳监测结果的日夜变化规律相似. 冬季模拟时段的机动车黑碳排放浓度贡献为 (3.5 ± 4.2) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 但是日间和夜间的贡献浓度却差异不大, 分别为 (3.4 ± 4.1) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 (3.7 ± 4.6) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 主要是因为冬季不利于扩散的时段 (17:00—次日 9:00) 相比夏季 (22:00—次日 6:00) 更长.

3.3 分车型黑碳排放与浓度贡献分担率

由于北京实施的货车区域限行政策, 日间和夜间的车型构成明显不同, 导致日间和夜间的分车型排放分担率特征也存在显著差异. 结果显示 (表 3), 日间时段, 小型客车和出租车在车流中占 96.6%, 尽管其单车黑碳排放因子低, 但黑碳排放量仍然占全部车辆排放的 49%. 公交车虽然在车流中仅占 0.9%, 由于其启停工况频繁, 黑碳排放因子高, 公交车的黑碳总排放量占全部车辆排放的 24%. 此外, 货车和大中型客车还分别贡献了 13% 和 14% 的黑碳排放. 夜间时段, 货车的比例明显上升, 达到 7.1%; 其黑碳排放夜间也占了主导地位, 贡献了 70%. 此外, 大中型客车和小型客车的黑碳排放分别贡献了 13% 和 12%.

基于上述黑碳排放的车型分担率, 本研究进一步分析了不同时段典型车队对道路边监测点的黑碳浓度贡献, 如表 3 所示. 值得关注的是, 小型客车为对道路边监测站点贡献最高的车型, 尤其在日间时段, 为 (1.07 ± 1.57) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其贡献浓度约为日间

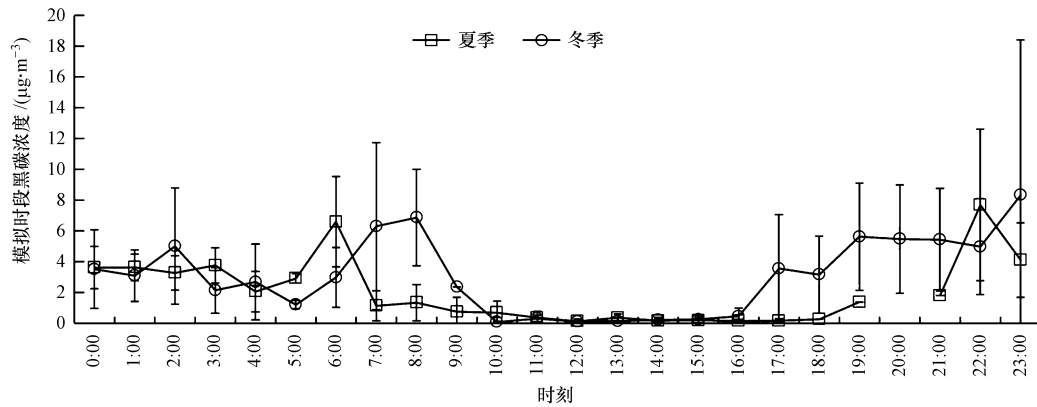


图6 道路边黑碳扩散模拟时均浓度

Fig.6 Simulated hourly roadside concentration of black carbon contributed by road emissions

表3 分车型的道路黑碳排放分担率及其对道路边监测点的模拟贡献浓度

Table 3 Contributions of black carbon emissions and simulated concentration from different vehicle fleet categories at roadside

车型规格	排放分担率		对道路边监测点的模拟贡献浓度 / ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)		
	日间	夜间	全天	日间	夜间
小型客车	44%	12%	0.98 ± 1.24	1.07 ± 1.57	0.40 ± 0.38
大中型客车	14%	13%	0.39 ± 0.49	0.35 ± 0.51	0.46 ± 0.43
货车	13%	70%	0.78 ± 0.99	0.31 ± 0.46	2.44 ± 2.31
出租车	5%	3%	0.11 ± 0.14	0.11 ± 0.17	0.09 ± 0.08
公交车	24%	2%	0.49 ± 0.63	0.58 ± 0.85	0.05 ± 0.05

第二大贡献者公交车的两倍.而进入夜间时段后,小型客车和公交车的贡献浓度均大幅下降.由于北京实施的货车区域限行政策,货车在夜间时段的贡献浓度明显增加,由日间的(0.31 ± 0.46) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升至(2.44 ± 2.31) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (浓度分担率高达70%).虽然货车全天流量仅占总车流量的4%,但其黑碳排放因子高,并且主要集中在气象条件不利于扩散的夜间出行,其在夜间的贡献浓度甚至超过占总车流量80%的小型客车在日间的贡献浓度.因此,综合北京市城区气象扩散条件昼夜差异及各时段路网运行压力等多方面因素,在气象条件利于扩散并且交通运行压力相对较小的时段(如中午前后10:00—13:00)可考虑允许重型货车驶入五环以内部分地区,从而减少重型货车在夜间集中出行给城市空气质量带来的压力.

4 结论(Conclusions)

1)北四环中路西段时均车流量及速度变化均呈现出早晚高峰特征.由于北京市采取了货车区域限行的措施,日间(6:00—23:00)小客车所占比例最高,占总车流量的82.2%.夜间(23:00—次日6:00)小客车所占比例有所降低,占总车流量的

59.5%;而中重型货车和轻型货车的构成比例显著升高,分别为7.1%和10.6%.

2)北四环中路西段的机动车平均黑碳排放因子与重型柴油车在总车流中所占比例呈现出极强的相关性,日间时段的平均黑碳排放因子为(9.3 ± 1.2) $\text{mg}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{Veh}^{-1}$,夜间时段则上升至(29.5 ± 11.1) $\text{mg}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{Veh}^{-1}$.机动车黑碳排放强度在冬夏季差异不大($\pm 5\%$ 以内),且具有明显的早高峰和晚高峰特征.早高峰时段(7:00—9:00)和晚高峰时段(17:00—19:00)的时均黑碳排放强度分别为(106.1 ± 13.0) $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 和(102.6 ± 6.2) $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$.

3)监测数据显示 AERMOD 对道路边机动车黑碳排放的模拟效果较好,机动车黑碳排放对于道路边监测点的平均浓度贡献为(2.8 ± 3.5) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,平均贡献比例为18.6%.其中,由于昼夜及季节性气象条件的变化,导致道路边机动车黑碳浓度贡献呈现出夜间高于日间,冬季高于夏季的特征.

4)日间时段,小型客车的黑碳排放分担率最大,占44%,对道路边的浓度贡献模拟结果为(1.07 ± 1.57) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;其次为公交车.夜间时段货车比例明显上升,其黑碳排放分担率达70%,贡献浓度(2.44 ± 2.31) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.综合考虑排放强度、昼夜间

气象扩散条件和交通运行状况来制定更合理的交通限行政策(如分时段货车限行)可能会更有效地改善城市空气质量。

责任作者简介:吴焯(1975—),男,清华大学环境学院,副教授.主要研究方向是机动车排放污染控制、交通系统能源和排放生命周期分析。

参考文献(References):

- Ban-Weiss G A, McLaughlin J P, Harley R A, *et al.* 2008. Long-term changes in emissions of nitrogen oxides and particulate matter from on-road gasoline and diesel vehicles [J]. *Atmospheric Environment*, 42(2): 220-232
- 北京交通大学,北京交通发展研究中心. 2010. 北京市机动车污染控制决策支持系统的研究与建立 [R]. 北京:北京交通大学. 22-116
- Bond T C. 2007. Can warming particles enter global climate discussions? [J]. *Environmental Research Letter*, 2(4): 045030, doi:10.1088/1748-9326/2/4/045030
- Bond T C, Bhardwaj E, Dong R, *et al.* 2007. Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850—2000 [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 21(2): 1-16
- Bond T C, Doherty S J, Fahey D W, *et al.* 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment [J]. *American Geophysical Union*, 118(11): 5380, doi: 10.1002/jgrd.50171
- Chen H, Bai S, Eisinger D, *et al.* 2009. Predicting near-road PM_{2.5} concentrations: comparative assessment of CALINE4, CAL3QHC and AERMOD [J]. *Transportation Research Record*, 2123: 26-37
- Du X, Fu L X, Ge W H, *et al.* 2011. Exposure of taxi drivers and office workers to traffic-related pollutants in Beijing: A note [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(1): 78-81
- Du X, Wu Y, Wang S, *et al.* 2013. Intake fraction of PM_{2.5} and NO_x from vehicle emissions in Beijing based on personal exposure data [J]. *Atmospheric Environment*, 57: 233-243
- Fu X, Wang S X, Zhao B, *et al.* 2013. Emission inventory of primary pollutants and chemical speciation in 2010 for the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 70: 39-50
- Hallquist A M, Jerksjo M, Fallgren H, *et al.* 2012. Particle and gaseous emissions from individual diesel and CNG buses [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*, 12(10): 27737-27773
- Jacobson M Z. 2002. Control of fossil-fuel particulate black carbon plus organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming [J]. *Journal of Geophysical Research*, 107(D19): doi:10.1029/2001JD001376
- Kirchstetter T W, Harley R A, Kreisberg N M, *et al.* 1999. On-road measurement of fine particle and nitrogen oxide emissions from light- and heavy-duty motor vehicles [J]. *Atmospheric Environment*, 33(18): 2955-2968
- Kirchstetter T W, Novakov T. 2007. Controlled generation of black carbon particles from a diffusion flame and applications in evaluating black carbon measurement methods [J]. *Atmospheric Environment*, 41(9): 1874-1888
- 孔茜, 吴焯, 杨柳, 等. 2010. 奥运期间北京典型交通环境气态污染物特征及人体吸入剂量 [J]. *环境科学学报*, 30(2): 281-286
- Misra A, Roorda M J, MacLean H L. 2013. An integrated modelling approach to estimate urban traffic emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 73: 81-91
- Reynolds C C O, Grieshop A P, Kandlikar M. 2011. Climate and health relevant emissions from in-Use Indian three-wheelers fueled by natural gas and gasoline [J]. *Environmental Science and Technology*, 45(6): 2406-2412
- Sewartz J, Coull B, Laden F, *et al.* 2008. The effect of dose and timing of dose on the association between airborne particles and survival [J]. *Environmental Health Perspectives*, 116(1): 64-69
- 宋少洁, 吴焯, 蒋靖坤, 等. 2012. 北京市典型道路交通环境细颗粒物元素组成及分布特征 [J]. *环境科学学报*, 32(1): 66-73
- Song S J, Wu Y, Xu J Y, *et al.* 2013. Black carbon at a roadside site in Beijing: temporal variations and relationships with carbon monoxide and particle number concentration [J]. *Atmospheric Environment*, 77: 213-221
- Song W W, He K B, Lei Y. 2012. Black carbon emissions from on-road vehicles in China, 1990—2030 [J]. *Atmospheric Environment*, 51: 320-328
- 唐杨, 韩贵琳, 徐志方. 2013. 北京及其北部地区大气降尘中的黑碳含量特征 [J]. *环境科学学报*, 33(2): 332-338
- U. S. Environmental Protection Agency. 2012. User's guide for the AMS/EPA Regulatory Model-AERMOD [R]. USA: EPA. 1-5
- Wang S X, Zhao M, Xing J, *et al.* 2010. Quantifying the air pollutants emission reduction during the 2008 Olympic Games in Beijing [J]. *Environmental Science and Technology*, 44(7): 2490-2496
- Wang S X, Hao J M. 2012. Air quality management in China: Issues, challenges, and options [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 24(1): 2-13
- Wang X, Westerdahl D, Wu Y, *et al.* 2011. On-road emission factor distributions of individual diesel vehicles in and around Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 45(2): 503-513
- Weingartner E, Saathoff H, Schnaiter M, *et al.* 2003. Absorption of light by soot particles: determination of the absorption coefficient by means of aethalometers [J]. *Journal of Aerosol Science*, 34(10): 1445-1463
- Wu Y, Wang R J, Zhou Y, *et al.* 2011. On-road vehicle emission control in Beijing: Past, present, and future [J]. *Environmental Science and Technology*, 25(1): 147-153
- Wu Y, Zhang S J, Li M L, *et al.* 2012. The challenge to NO_x emission control for heavy-duty diesel vehicles in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(19): 9365-9379
- Wu Y, Yang L, Zheng X, *et al.* 2014. Characterization and source apportionment of particulate PAHs in the roadside environment in Beijing [J]. *Science of the Total Environment*, 470-471: 76-83
- 薛佳平, 田伟利, 张清宇. 2010. 杭州市机动车 NO_x 排放清单的建立

- 及其对空气质量的影响[J]. 环境科学研究, 15(1): 613-618
- Zhang S J, Wu Y, Liu H, *et al.* 2013. Historical evaluation of vehicle emission control in Guangzhou based on a multi-year emission inventory [J]. *Atmospheric Environment*, 76: 32-42
- Zhang S J, Wu Y, Liu H, *et al.* 2014a. Real-world fuel consumption and CO₂ emissions of urban public buses in Beijing [J]. *Applied Energy*, 113: 1645-1655
- Zhang S J, Wu Y, Wu X M, *et al.* 2014b. Historic and future trends of vehicle emissions in Beijing, 1998—2020: A policy assessment for the most stringent vehicle emission control program in China [J]. *Atmospheric Environment*, 89: 216-229
- 中华人民共和国环境保护部. 2012. 2012 年中国机动车污染防治年报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部. 1-2
- Zhou Y, Wu Y, Yang L, *et al.* 2010. The impact of transportation control measures on emission reductions during the 2008 Olympic Games in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 44(3): 285-293